

DOI: 10.11779/CJGE201602010

动力离心模型试验循环剪应力 - 剪应变反演方法对比

王永志^{1, 2}, Daniel W Wilson², Mohammad Khosravi³, 袁晓铭¹, C Guney Olgum³

(1. 中国地震局工程力学研究所地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080; 2. 加州大学戴维斯分校土工模拟中心, 加州 95616; 3. 弗吉尼亚理工学院, 黑堡 24061)

摘要:介绍了基于加速度阵列建立的3种循环剪应力 - 剪应变反演方法, 分析了应用条件和影响因素。基于一组软黏土地面加固动力离心模型试验, 探讨了试验加速度记录反演位移的信号处理方法, 与多状态下实测位移对比, 验证了有效性与可靠性。运用3种反演方法分别求取了两次试验、多种波激励下, 自由场地和加固场地内土体剪应力 - 剪应变动态响应过程。结果表明, 在传感器布设间距和采样率满足应用条件下, 3种反演方法可获得基本一致结果并反映基本规律, 上层土体剪应力小、剪应变大, 土体剪切模量与围压密切联系; 自由场地剪应变远大于加固场地, 并因土体软化呈现强非线性。3种方法对比, 三次样条法反演结果准确性对传感器布设间距和采样率较为敏感。

关键词: 动力离心试验; 剪应力 - 剪应变; 反演方法; 加速度时程

中图分类号: TU411.8 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2016)02-0271-07

作者简介: 王永志(1984-), 男, 河南周口人, 助理研究员, 从事动力离心试验方法研究。E-mail: yong5893741@163.com。

Evaluation of cyclic shear stress-strain using inverse analysis techniques in dynamic centrifuge tests

WANG Yong-zhi^{1, 2}, Daniel W Wilson², Mohammad Khosravi³, YUAN Xiao-ming¹, C Guney Olgum³

(1. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China; 2. Center for Geotechnical Modeling, University of California, Davis 95616, America; 3. Virginia Polytech Institute State University, Blacksburg 24061, America)

Abstract: Evaluation of shear stress-strain characteristics in soils is paramount to the fundamental understanding of soil behavior in dynamic centrifuge tests. Three inverse analysis techniques for evaluating cyclic shear stress-strain response using data from accelerometer arrays are introduced and key factors that require consideration in the applied condition are discussed. Using a series of dynamic centrifuge tests on soft soil sites with stiff ground reinforcement, the data process for back-calculated displacements from acceleration records is presented. The back calculated displacements are compared to the recorded displacements in several cases with excellent agreements. The three inverse analysis techniques are used to estimate the dynamic shear stress-strain responses in the free field and with in the reinforced ground in two centrifuge tests with different shaking motions of varying magnitudes. The results demonstrate that as long as accelerometer spacing and sampling frequency are sufficient to the active mechanics, the calculated shear stress-strain responses from three inverse techniques are consistent and therefore likely accurately reflect the basic characteristics of interest. In these tests it is observed that shear stiffness decreased at shallower depths, consistent with the expected effects of confining pressure on shear stiffness. It was also observed that the amplitudes of shear strain in the free field are considerably larger, and stronger nonlinear features were observed in the stress-strain loops as compared to the motions with in the reinforced soil. With comparisons among the three inverse analysis techniques, the evaluation from cubic spline approach was more sensitive and the linear and weighted residual techniques produced more reasonably consistent results.

Key words: dynamic centrifuge test; shear stress-strain; inverse analysis technique; acceleration record

0 引言

在岩土地震工程和土动力学研究中, 循环剪应力 - 剪应变响应形式和发展水平, 是认识动荷载(地震荷载等)下土体变形机理和评估场地危险性的根本途

基金项目: 中央级公益性研究所基本科研业务费专项项目(2014B09);
国家自然科学基金项目(41272357); 黑龙江省自然科学基金项目(LC2015021)

收稿日期: 2014-09-08

径之一，也是描述土体非线性动力行为的基本方法^[1-3]。现有科研方法中，室内单元土体试验通常以获取剪应力 - 剪应变发展过程与变化参数为主要目标，如共振柱、动三轴、动剪切等试验；数值试验一般则要求动剪切模量和阻尼比作为土体动力模拟的基本输入参数^[4-5]。因此，获取模型试验和测试现场各层土体循环剪应力 - 剪应变响应过程，对于认识场地反应机制、土-结动力特性和开展数值模拟试验具有至为重要的科学意义。

Zeghal 等基于现场地震加速度记录提出了剪应力 - 剪应变线性反演方法^[6]; Brennan 等应用线性反演方法求解了动力离心模型试验不同土体剪切模量和阻尼比，并讨论了结果影响因素^[4]; Davis 等基于现场加速度记录提出了剪应力 - 剪应变三次样条法和余弦法^[7]; Kamai 等对比了离心模型试验中传感器布设密度与不同剪应力 - 剪应变反演方法稳定性^[5]; Wilson 提出了用于获取桩体变形的加权残差方法^[8]; Brandenberg 等基于不同量测方法下，探讨了加权残差反演方法可靠性^[9]; 刘晶波等应用线性反演方法求取了动力离心模型黏土和砂土自由场剪应力 - 剪应变发展过程^[2]。

本文以对比动力离心模型试验循环剪应力 - 剪应变反演方法及影响因素为主旨, 分析基于加速度阵列可建立的三类剪应力 - 剪应变反演方法和应用条件, 探讨加速度信号处理方法与反演位移可靠性。基于一组软黏土地带加固动力离心模型试验, 比较不同试验、多种激励荷载下, 自由场地和加固场地剪应力 - 剪应变响应特征, 研究 3 种反演方法可靠性和影响因素。

1 3 种反演方法对比

理论而言，基于加速度记录反演剪应力-剪应变响应过程的一个基本要求为：竖向相邻传感器布设距离应小于被施加荷载波长 $1/8$ ，而若大于波长 $1/2$ ，则失效^[4-5]。举例：假定土层平均剪切波速为 100 m/s ，相邻传感器垂直距离为 4 m ，反演方法则可精确获取 3.125 Hz 以下剪切荷载响应，可较好获取频率 12.5 Hz 以下剪切荷载响应， 12.5 Hz 以上失效。

根据各方法基本思想和提出历史，依次介绍、对比具有代表性的线性方法、三次样条法和加权残差法。线性方法最先提出，假定土层侧面沿重力方向动态变形符合一维（1D）剪切梁模型，地表为剪应力和剪应变恒等于零的自由表面，基于加速度阵列建立的循环剪应力-剪应变反演模型^[6]，如图1所示。图1中各符号含义，为便于理解和对比，与随后计算式一起阐述。线性反演方法剪应力计算式如下：

$$\tau_i(t) = \sum_{k=1}^i \rho \frac{a_k(t) + a_{k-1}(t)}{2} \Delta z_k \quad (i=1,2,3,\dots) \quad . \quad (1)$$

式中 i 为自地表 0 算起, 坚向第 i 个加速度测点; t 为加速度记录任意时刻; τ_i 为测点 i 处剪应力; a_i 为测点 i 处加速度幅值, Δz_k 为第 k 测点与 $k-1$ 测点坚向距离; ρ 为土体密度。由式(1)可发现, 各处剪应力以相邻两测点加速度平均值计算, 由地表向深度方向逐渐增大。与式(1)对应线性剪应变计算^[6]得

$$\gamma_i(t) = \frac{1}{\Delta z_{i+1} + \Delta z_i},$$

$$\left[(u_i(t) - u_{i-1}(t)) \frac{\Delta z_{i+1}}{\Delta z_i} + (u_{i+1}(t) - u_i(t)) \frac{\Delta z_i}{\Delta z_{i+1}} \right], \quad (2)$$

式中, γ_i 为测点 i 处剪应变, u_i 为加速度信号处理和双重积分获取的测点 i 处位移。线性剪应变计算基于相邻 3 个测点位移与之间距离进行线性插值, 获取发生的侧移后, 除以两段布设距离得到。

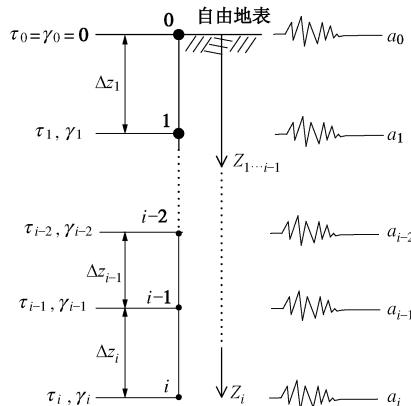


图 1 基于加速度 1D 剪切梁模型反演方法示意图

Fig. 1 1D shear beam model for inverse analysis based on recorded acceleration

三次样条法提出的基本思想：基于获取的土层侧面各测点处侧移值，设定变形趋势函数，利用各点侧移和深度进行拟合，再对深度求导获取剪应变。三次样条法剪应力计算式^[7]为

$$\tau_{m,i}(t) = \sum_{k=1}^i \left(\rho \frac{a_k(t) + 3a_{k-1}(t)}{4} \frac{\Delta z_k}{2} + \rho \frac{3a_{k-1}(t) + a_{k-2}(t)}{4} \frac{\Delta z_{k-1}}{2} \right), \quad (3)$$

式中, $\tau_{m,i}$ 为测点 i 和 $i-1$ 中点处剪应力值。由式(3)可得, Davis 等提出的剪应力计算方法以两个测点中心为求值点, 并考虑了相邻两个测点加速度所占不同权重, 而推广到测点处其剪应力计算式与式(1)相同, 为便于比较 3 种方法反演结果, 本文均以测点处剪应力 - 剪应变为目标, 各方法剪应力以式(1)求解。三次样条反演方法剪应变计算, 表达式为

$$D_i(z,t) = a_i(z - Z_i)^3 + b_i(z - Z_i)^2 + c_i(z - Z_i) + d_i, \quad (4)$$

式中, $D_i(z,t)$ 为任意时刻 t 在土体侧面深度 z 发生的位移变化, Z_i 为测点 i 深度。按照各时刻拟合 $D_i(z,t)$ 公式, 对深度 Z_i 求导, 便获取土体侧面任意深度 z 处剪应变变化。三次样条法优点是可根据需要任意设置趋势函数, 除三次样条外, 还可使用余弦和其他函数。

加权残差法基于不同测点深度和侧移值所占比重的考虑, 获取土体侧面剪应变变形曲线。Brandenberg^[9]、Wilson^[8]提出的加权残差方法剪应变计算, 表达式为

$$\begin{pmatrix} \gamma_0 \\ \gamma_1 \\ \gamma_2 \\ \vdots \\ \gamma_{i-1} \\ \gamma_i \end{pmatrix} = 3 \begin{bmatrix} 2(Z_1 - Z_0) & (Z_1 - Z_0) & 0 & 0 & \cdots & u_1 - u_0 \\ (Z_1 - Z_0) & 2(Z_2 - Z_0) & (Z_2 - Z_1) & 0 & \cdots & u_2 - u_0 \\ 0 & (Z_2 - Z_1) & 2(Z_3 - Z_1) & (Z_3 - Z_2) & \cdots & u_3 - u_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \cdots & 0 & (Z_{i-1} - Z_{i-2}) & 2(Z_i - Z_{i-2}) & (Z_i - Z_{i-1}) & u_i - u_{i-2} \\ \cdots & 0 & 0 & (Z_i - Z_{i-1}) & 2(Z_i - Z_{i-1}) & u_i - u_{i-1} \end{bmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} u_1 - u_0 \\ u_2 - u_0 \\ u_3 - u_1 \\ \vdots \\ u_i - u_{i-2} \\ u_i - u_{i-1} \end{pmatrix}. \quad (5)$$

由式(5)可发现, 各测点剪应变计算涉及上下相邻4个测点位移和3段布设距离, 3段布设距离权重比为1:2:1。由此可知, 加权残差法要求较高的传感器布设密度和布设数量, 才能更好地发挥效果。

总体比较, 剪应力由加速度记录和测点布设距离直接求解, 其精确性和可靠性对传感器布设密度和信号处理方法具有较小敏感性; 而剪应变基于加速度记录滤波、积分等信号处理获取位移, 再由测点距离获取, 其准确性和可靠性对数据质量和信号处理方法相对更为敏感。

2 动力离心模型试验

一组有关深层(水泥)搅拌格栅桩加固的软黏土动力离心模型试验, 在加州大学戴维斯分校(University of California, Davis)半径9.1 m大型动力离心机上完成^[10]。该组试验分为两个阶段: 第一阶段不包含结构物, 目标对比深层搅拌格栅桩加固场地和未加固自由场地地震反应差异, 定义为MKH01; 第二阶段含有结构物, 目标评估和探索深层搅拌格栅桩抗震性能和土-基-结动力作用机制, 定义为MKH02。MKH02试验模型如图2所示, 其中图2(a)为3D模型结构与传感器布设, 图2(b)为模型中心轴剖面(沿长度方向); 与MKH01模型差异仅在MKH01模型格栅桩上方安设了结构物。试验使用铰接板式模型箱(内尺寸: 1756 mm×649 mm×516 mm), 由高强度铝合金板框堆叠而成, 各层之间可自由移动。试验在57g离心加速度下完成, 土体材料和详细试验介绍见文献[11]。

模型土体加速度传感器布设, 自下而上共5列, 本文研究涉及处于中心轴剖面内两列, 即图2(b)中FH-A1~FH-A6和SH-A1~SH-A6, 两列沿模型箱中心面(沿宽度方向)对称布置, 分别用于量测自由场

地和格栅桩加固场地土层地震响应。另外, 为检验加速度记录获取位移的信号处理方法可靠性及应用扩展, 本文研究还涉及模型箱、自由场地表和结构物浅基础3处成对加速度和位移传感器, 分别为CR-A1与CR-L1、FSV-A1与F-L1、FT-A1~2和FT-L1~2, 具体位置如图2(b)所示。

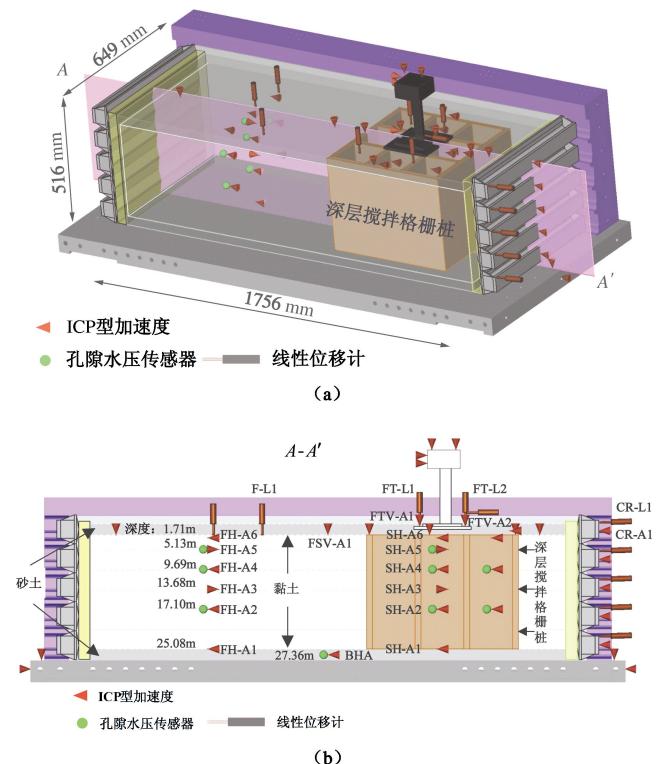
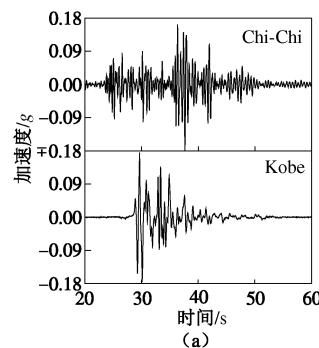


图2 3D模型结构与传感器布设及中心轴A-A'剖面

Fig. 2 3D configuration and A-A' center section of model with instrumentation

试验选用正弦扫频波(频率: 7~333 Hz)、Chi-Chi地震和Kobe地震, 作为离心振动台台面激励。台面记录Chi-Chi和Kobe地震加速度时程与反应谱分别如图3(a)、(b)所示, 两种模拟地震PGA均为0.18g。图3可得出, Chi-Chi为短周期地震, 以高频为主; Kobe为长周期地震, 以低频为主, 要求加速度信号处理设计滤波器对记录时程的频率成分和振幅有较强应用性。



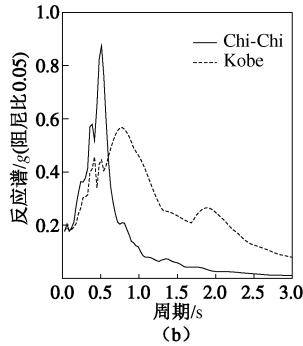


图 3 离心振动台面记录地震波加速度时程与反应谱

Fig. 3 Time series and spectra of earthquake motions generated by centrifuge shaker

3 信号处理方法与可靠性

试验加速度传感器最高工作频率 13 kHz (3 dB), 试验 MKH02 和 MKH01 采样率分别为 5 kHz 和 1.6 kHz。因此, 相对采样率, 加速度记录的高频成分足够可靠。通过多种尝试方法, 最终选取巴特沃兹高通滤波器作为基本信号处理方法^[6-9], 阶数为 3, 频率为 10 Hz。另外, 在数据滤波处理前, 应对加速度时程中地震前/后部分静态数据做置零处理, 以降低噪音信号对滤波结果影响, 有效解决获取位移基线偏移问题。本文在加速度记录滤波后, 直接应用两次积分获取位移响应, 其中水平向量测位移和加速度反演积分位移对比, 如图 4 所示。

位移传感器 CR-L1 和加速度传感器 CR-A1 布设于模型箱最顶层铝合金板框端部外侧, 在试验中可认为刚性。图 4 中, 量测位移为 CR-L1 实测记录, 积分位移为 CR-A1 记录信号处理获取位移, 其中图 4 (a) 为试验 MKH01 和 MKH02 中台面 Chi-Chi 地震, PGA 为 0.18g 和 0.31g 条件下位移对比; 图 4 (b) 为试验 MKH01 和 MKH02 中台面 Kobe 地震, PGA 为 0.18g 和 0.51g 条件下位移对比。

图 4 结果表明, 不同试验 (MKH01 和 MKH02)、不同地震 (Chi-Chi 和 Kobe) 和不同强度 (PGA0.18g、0.32g 和 0.51g) 条件下, 积分和量测位移均表现很高吻合度, 充分验证了试验加速度记录获取位移信号处理方法的可靠性和准确性。在图 4 中, MKH02 试验 PGA0.51Kobe 地震中结果可发现, 积分位移和量测位移在激励结束后存在明显差异, 这是由于位移传感器可有效记录永久位移, 而加速度传感器基于工作原理和低频响应限制不能有效获取永久位移, 但在振动过程中积分位移和量测位移表现出一致结果。

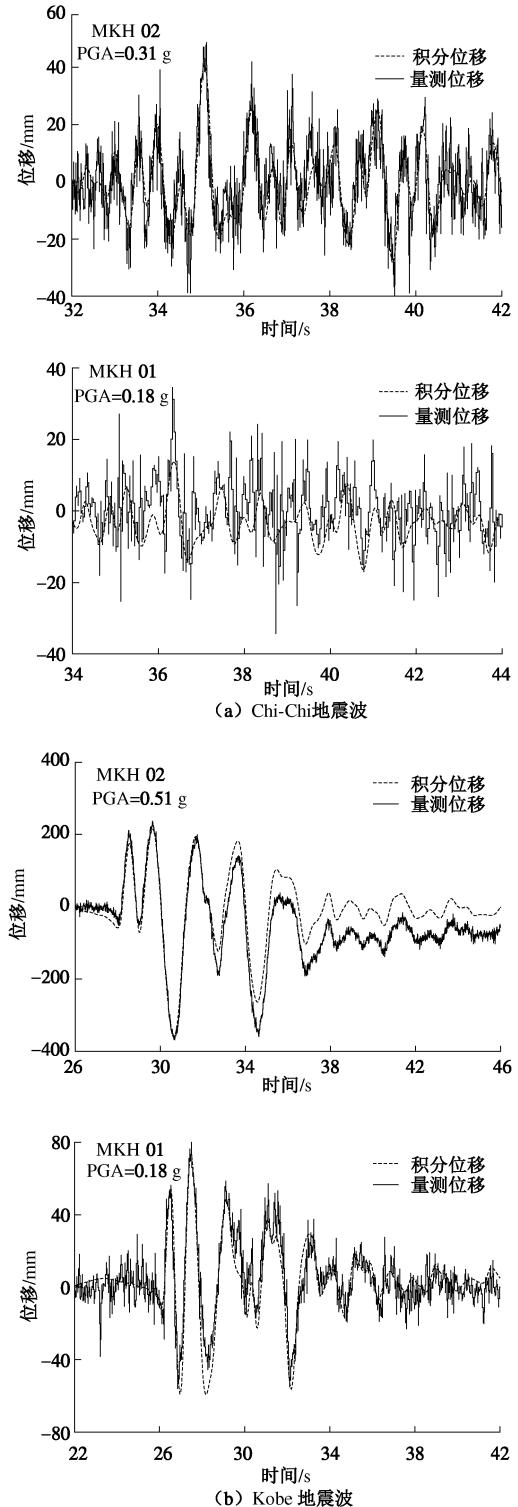


图 4 不同模拟地震试验量测位移与加速度反演积分位移对比

Fig. 4 Time series of measured and back-calculated displacements from acceleration during different motions

为进一步验证信号处理方法有效性和拓展应用, 基于竖向加速度和位移传感器的位移结果也进行了对比, 结果如图 5 所示, FSV-A1 和 F-L1 分别量测自由场地竖向加速度和沉降; FTV-A1~2 和 FT-L1~2 分别量测结构物浅基础两端竖向加速度和位移。图 5 结

果表明, 信号处理方法对竖向加速度同样十分有效, 加速度获取位移可较准确反映竖向动态位移变化, 可用于有效监测和评估激励过程中结构物的摇摆幅度。另外, FSV-A1 积分位移和 F-L1 量测位移出现一定幅度偏差, 可能由于与加固场地距离不同造成(见图 2)。

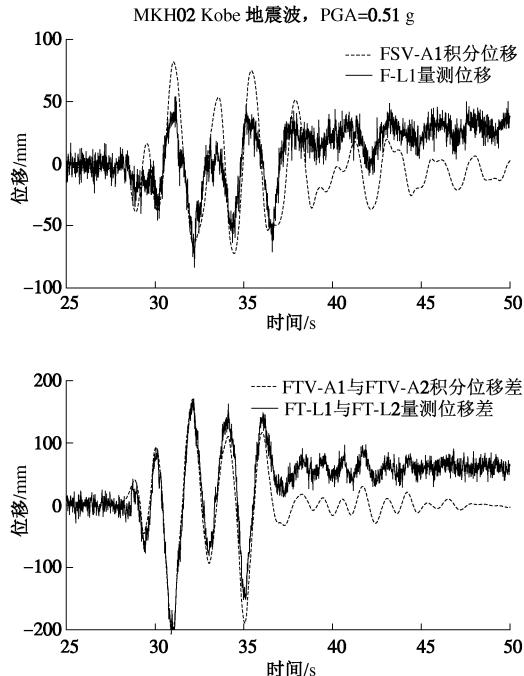


图 5 垂直向量测位移和积分位移对比

Fig. 5 Comparison between estimated and measured displacements in vertical direction

4 剪应力 - 剪应变结果分析

根据 3 种反演方法和试验加速度记录处理结果, 利用 Mathcad 编写计算程序, MKH01 和 MKH02 试验中有代表性剪应力 - 剪应变结果, 如图 6~8 所示。图 6 给出了 MKH02 试验台面 PGA0.03g 正弦扫频波中, 自由场地深度 5.13 m (FH-A5), 9.69 m (FH-A4) 和 13.68 m (FH-A3) 处加速度时程和剪应力 - 剪应变响应, 其中剪应力 - 剪应变给出了 3 种反演方法结果对比。实际上, 正弦扫频波是为控制离心振动台输出运动精度而设计的低强度波, 也可用于获取模型动力基本特性。图 6 中加速度时程显示, 地震动沿深度向上逐层放大; 剪应力 - 剪应变结果表明, 3 种基于不同思想的反演方法获得结果基本相同, 相互验证了基于加速度阵列获取剪应力 - 剪应变响应的可行性和有效性; 剪应力竖向向上逐层减小, 剪应变逐层增大, 证明土体剪切模量与围压密切相关。

图 7 给出了 MKH02 试验台面 PGA0.31g Chi-Chi 地震下, 自由场地 (a) 和加固场地 (b) 相同深度处加速度时程和剪应力 - 剪应变响应, 其中加固场地对

应传感器 SH-A5 (5.13 m)、SH-A4 (9.69 m) 和 SH-A3 (13.68 m)。对比图 7 (a)、(b) 中加速度时程, 可发现加固场地地震动竖向向上逐层增大, 而自由场地地震动则中间大、上部小, 表明土体可能出现软化。对比图 7 (a)、(b) 剪应力 - 剪应变响应, 3 种反演方法结果基本一致, 表明反演方法在中强地震动下仍具适用性, 受荷载强度和频率影响不明显; 加固场地各层土体剪应力基本相同, 剪应变 5.13 和 9.69 m 处基本相同, 13.68 m 处较小, 受格构栅桩影响, 未出现明显软化特征; 自由场地各层土体剪应力相对很小, 剪应变则相对较大且基本相同, 表现显著软化特征和强烈非线性, 由于数据点限制, 曲线十分不光滑, 要求提高采样率。

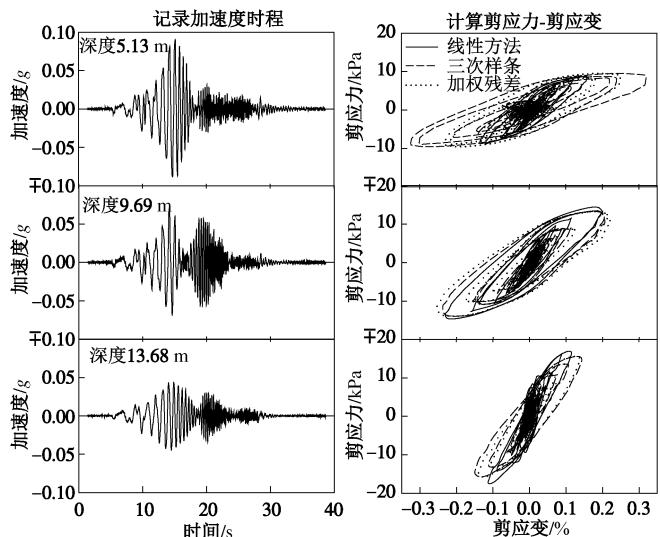
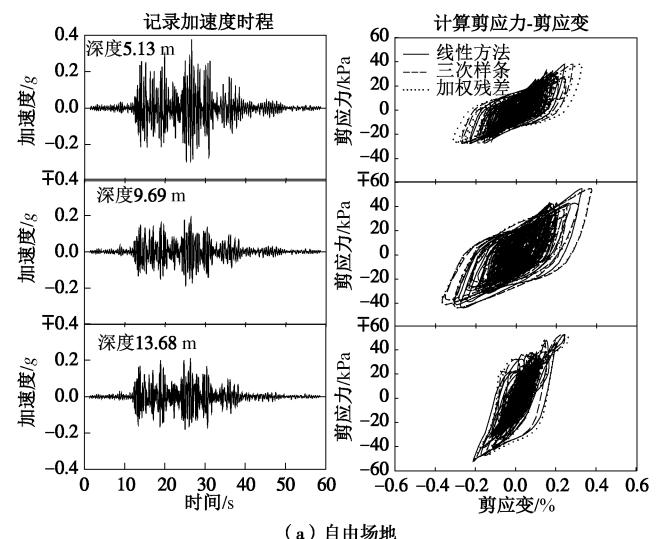


图 6 MKH02 试验正弦扫频波自由场地土体加速度时程和剪应力 - 剪应变响应(台面 PGA0.03g)

Fig. 6 Acceleration time series and shear stress-strain responses in free field of test MKH02 with sine sweep motion
(PGA0.03g on the base)



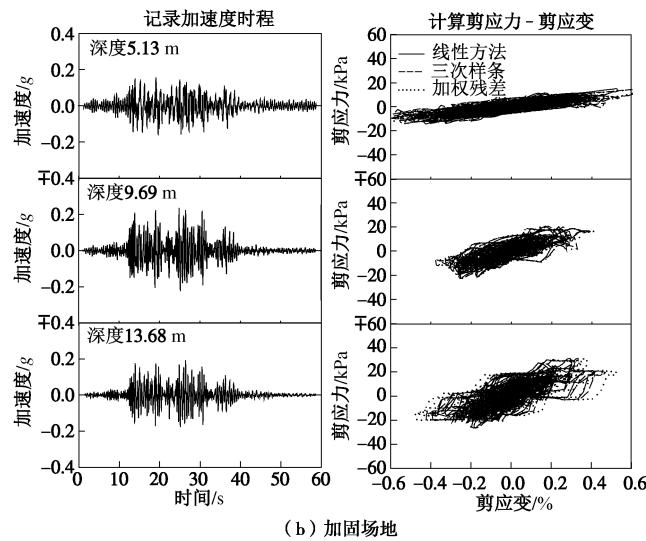


图 7 MKH02 试验 Chi-Chi 地震自由场地和加固场地土体加速度时程和剪应力 - 剪应变响应(台面 PGA0.31g)

Fig. 7 Acceleration time series and shear stress-strain responses in free field and reinforced field of test MKH02 with Chi-Chi motion (PGA0.31g on the base)

为便于清晰对比采样率对反演方法结果影响, 图 8 给出了 MKH01 (采样率 1.6 kHz) 和 MKH02 (采样率 5 kHz) 试验台面 PGA0.31g Chi-Chi 地震前 7 个往返荷载下, 加固场地相同位置处加速度时程和剪应力 - 剪应变响应。对比图 8 中 MKH01 和 MKH02 加速度时程, 土体内地震动在两次试验中得到了良好再现, 振幅基本相同, 沿竖向向上逐层增大。

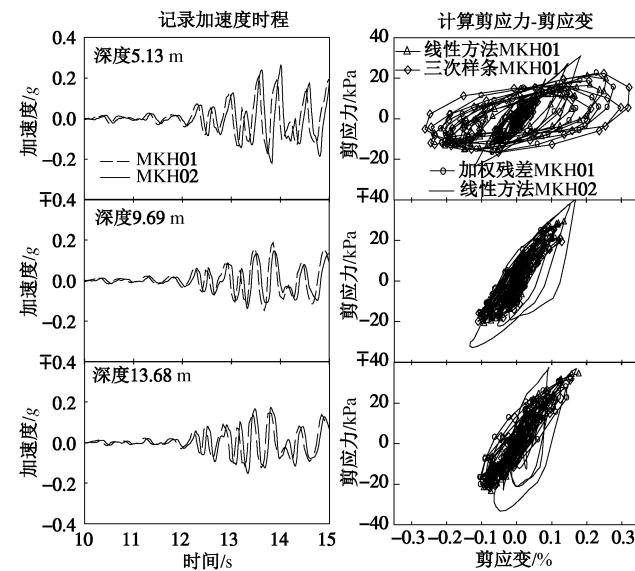


图 8 MKH01 和 MKH02 试验 Chi-Chi 地震加固场地土体加速度时程和剪应力 - 剪应变响应(台面 PGA0.31g)

Fig. 8 Acceleration time series and shear stress-strain responses in reinforced field of both test MKH01 and MKH02 with Chi-Chi motion (PGA0.31g on the base)

对比图 8 中剪应力 - 剪应变响应, MKH02 相比

MKH01 各层土体剪切模量明显增加, 原因 MKH01 中土体经一系列激励和再固结, 含水率和孔隙比下降; MKH01 中三次样条法剪应变结果相比线性和加权残差法较大, 特别是 5.13 m 处从荷载开始便出现软化特征, 而 MKH02 结果中相同荷载范围内未有软化特征, 由此可得出, 三次样条法对采样率较为敏感, 线性法和加权残差法反演结果稳定性相对较好。

5 结 论

由一组格栅桩加固软黏土动力离心模型试验, 研究了基于加速度阵列反演土体剪应力 - 剪应变响应的不同方法, 通过对比得到较为理想结果。动剪切模量和阻尼比是土体数值模拟动力分析的基本参数, 本文工作为相关数值模拟试验的本构建立提供了基本依据, 为物理试验与数值模拟相互验证建立了重要途径, 具有重要理论和应用价值。得到以下 4 点结论。

(1) 介绍了适用于动力离心模型试验的土体 3 种剪应力 - 剪应变反演方法和基本思想, 分析了应用条件; 对比了方法的内在差异和优缺点, 给出了不同方法影响因素和对比结果。

(2) 通过不同试验、不同类型地震与强度下, 水平量测位移和加速度积分位移对比, 验证了试验信号处理方法有效性和可靠性; 同时, 对比表明积分位移还可准确反映土体竖向位移和结构物摇摆的动态变化。

(3) 不同激励和强度条件下, 3 种反演方法可获得基本相同的剪应力 - 剪应变结果, 相互验证了有效性; 土体软化前, 剪应力沿深度向上逐层减小, 剪应变则逐层增大, 验证了土体剪切模量与围压密切联系。

(4) 对比加固场地和自由场地剪应力 - 剪应变结果, 格栅桩加固场地土体未出现明显软化现象, 而自由场地各层土体呈现一致软化特征, 且表现出强非线性, 滞回曲线十分不光滑, 为提高反演方法准确性, 需提高数据采样率和减小传感器布设距离。

致 谢: 加州大学戴维斯分校 Ross W. Boulanger 教授和东京工业大学 Shuji Tamura 副教授为本文提供了热情指导和有益资料, 在此表示诚挚感谢。

参 考 文 献:

- [1] 孙 锐, 袁晓铭, 刘晓健. 动剪切模量比与剪切波速对地震动影响及等量关系研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(8): 1267 - 1274. (SUN Rui, YUAN Xiao-ming, LIU Xiao-jian. Effects of dynamic shear modulus ratio and velocity on surface ground motion and their equivalent relations[J].)

- Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **31**(8): 1267 - 1274. (in Chinese))
- [2] 刘晶波, 赵冬冬, 张小波, 等. 地基自由场离心机振动台模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(11): 980 - 987. (LIU Jing-bo, ZHAO Dong-dong, ZHANG Xiao-bo, et al. Dynamic centrifuge model tests on an unconfined soil foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(11): 980 - 987. (in Chinese))
- [3] 徐光明, 吴宏伟. 大圆筒岸壁码头的量纲分析和离心模拟[J]. 岩土工程学报, 2007, **29**(10): 1544 - 1552. (XU Guang-ming, NG C W W. Dimensional analysis and centrifuge modeling of quay wall of large-diameter bottomless cylinders[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(10): 1544 - 1552. (in Chinese))
- [4] BRENNAN A J, THUSYANTHAN N I, MADABHUSHI S P G. Evaluation of shear modulus and damping in dynamic centrifuge tests[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, **131**(12): 1488 - 1497.
- [5] KAMAI R, BOULANGER R. Characterizing localization processes during liquefaction using inverse analysis of instrumentation arrays[M]// Meso-Scale Shear Physics in Earthquake and Landslide Mechanics. 2009: 219 - 238.
- [6] ZEGHAL M, ELGAMAL A W, TANG H T, et al. Lotungdownhole array. II: Evaluation of soil nonlinear properties[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1995, **121**(4): 363 - 378.
- [7] DAVIS R O, BERRILL J B. Rational approximation of stress and strain based on downhole acceleration measurements[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1998, **22**: 603 - 619.
- [8] WILSON D W. Soil-pile-superstructure interaction in liquefying sand and soft clay[D]. California: University of California, 1998.
- [9] BRANDENBERG S J, WILSON D W, RASHID M M. Weighted residual numerical differentiation algorithm applied to experimental bending moment data[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, **136**(6): 854 - 863.
- [10] 王永志. 大型动力离心机设计理论与关键技术研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2013. (WANG Yong-zhi. Study on design theory and key technology of large dynamic centrifuge[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2013. (in Chinese))
- [11] KHOSRAVI M, TAMURA S, WILSON D W, et al. Reduction of seismic shaking intensity on soft soil sites using stiff ground reinforcement—Report 2 & 3: Big centrifuge test data MKH01-MKH02[R]. 2014.