

响嘎钻井台阵场地土体动力特性反演分析^{*}

陈学良^{1),*} 金 星^{1,2)} 陶夏新^{1,3)} 韦永祥¹⁾

1) 中国哈尔滨 150080 中国地震局工程力学研究所

2) 中国福州 350003 福建省地震局

3) 中国哈尔滨 150008 哈尔滨工业大学

摘要 为了认识响嘎真实地震动下土体动力特征,分析场地响应,以及检验和提高工程钻探方法、现场测试及土工试验的精度,通过层转换矩阵永为实矩阵的成层场地地震反应分析,结合遗传算法-单纯形法这一全局-局部混合优化方法,进行了同时考虑 SH、P 和 SV 波型的多分量实际波形的反演拟合.最后给出了响嘎钻井台阵(2[#])3 次中小地震反演结果,并提供了以往研究中没有涉及的纵波波速值、阻尼比值及与频率有关的阻尼频率因子 b 值.结果表明,反演的响嘎 2[#] 钻井台阵剪切波速值大于 1994 年单孔原位波速测试结果,而更接近于距其 200 多米的 3[#] 的剪切波速结果;并发现在峰值加速度 $60 \times 10^{-2} \text{ m/s}^2$ 量级的地震作用中就存在反演可以察觉的土体非线性.另外,该方法亦可用于其它钻井台阵的研究和分析.

关键词 响嘎钻井台阵 反演分析 场地土体 剪切和纵波波速 阻尼比

中图分类号: P315.9 **文献标识码**: A

引言

场地钻井台阵观测资料来之不易,不仅需要勘查、勘探、钻井、现场试验及室内土工试验等复杂工序,而且要布设多台宽频带数字仪器且需同时获取高质量强震信息.这些珍贵资料如何被合理有效地利用是近年来国内外学者热衷探讨的问题之一.

土体动力特性参数多由单孔原位测波速试验、土动力学试验得到,但土工试验多少会受土样扰动的限制,很难再现原状土体的应力状态、地震作用进程、现场成层场地条件、以及恰当的边界条件等.而强震观测资料尤其是场地的钻井台阵观测资料,对于原位测试和实验室土工试验而言,是非常有价值的,可以作为强有力的辅助和补充手段.而且,它能提供试验所不易模拟的整个动力过程的原状土体动力特性的重要信息.这对于认识土体动力特性,分析场地响应,检验和提高工程钻探方法,以及现场测试和土工试验的精度具有重要意义.

比较著名的场地钻井台阵有我国台湾的罗东和花莲,美国加州的 Treasure Island 和 Wildlife Refuge,日本的 Port Island 等.在我国大陆地区,由中国地震局工程力学研究所主持,在河北唐山余震区的响嘎镇建成了第一个三维场地影响观测台阵(谢礼立等,

^{*} 地震科学联合基金(604036, 105034)资助.

2006-11-09 收到初稿,2007-11-18 决定采用修改稿.

⁺ 通讯作者. e-mail: xueliang_chen@yahoo.com.cn

1999). 2001 年又由中国地震局工程力学研究所负责对该观测台阵进行了扩建和改造^①. 该钻井台阵工作以来获得了一大批高质量中小地震记录. 本文基于 3 次典型地震记录进行了土动力特性、场地效应的反演分析.

Satoh 等(1997, 2001)、Ikemoto 等(2000)均针对钻井台阵记录, 基于一维线弹性 SH 波动模型并采用减小观测谱比和理论谱比之间残差的方法, 来确定剪切波速和频率相关的阻尼效应, 以分析土体的动力特性. 后来, Satoh 等(1997)将该方法推广到日本东部 Shizuoka 县钻孔记录评估火山沉积土的非线性行为研究中, 以及日本 Nanko、Amagasaki、Takasago 场地基于应变的土体非线性动力参数的反演中, 在反演过程中采用了共轭梯度法.

本文在 Satoh 等(1997, 2001)、Ikemoto 等(2000)研究方法的基础上进行了重要改进: 一是优化算法, 由遗传算法和单纯形法相结合的方法代替原来的单一优化方法——共轭梯度法; 二是由简单的传递函数的反演转变为直接实际地震记录波形的反演; 三是由单纯垂直入射 SH 波分析改进为同时考虑 SH、P 和 SV 波型的多分量反演拟合. 这些改进将提高反演精度, 且会更全面、更真实地给出土体动力特性参数.

1 成层介质场地反应分析方法

反演计算必然要设计高效的正演计算, 这就要求数学物理模型尽可能简洁. 对于浅表地层沿横向变化相对不大的场地, 可用成层模型模拟, 而对于中小地震则可采用线性模型. 该模型对于地震动位移、速度和加速度可直接输入, 求得场地的位移、速度和加速度响应.

图 1 为水平成层的 N 层介质模型, 第 n 层厚度为 d_n , 密度为 ρ_n , 剪切波波速为 β_n , P 波波速为 α_n ; 第 N 层为弹性半空间($d_N \rightarrow \infty$), u 表示质点振动正方向(单位矢量). 该问题首先由 Thomson (1950) 针对体波提出了传递矩阵方法, 后由 Haskell (1953) 改进推广到面波分析中. Knopoff (1964) 讨论了混合的 Thomson-Haskell 方法, 后来又发展到 Schwab-Knopoff 方法、 δ 矩阵法、Abo-Zena 法、RT 矩阵法等.

陈运泰 (1974a, b) 对该问题进行了系统总结和分析, 将位移场表达为 Hansen 向量的叠加形式, 根据各层应力位移连续, 求得层底面位移应力谱向量与层顶面波振幅谱向量之间的转换矩阵 D , 从而得到层底面与层顶面位移应力谱向量之间的 6×6 转换矩阵层矩阵 α . 其中 P-SV 波、SH 波分别与四阶方阵和二阶方阵相联系, 两者之间相互独立、互不耦合. 再根据自由表面应力为零的条件, 求得自由

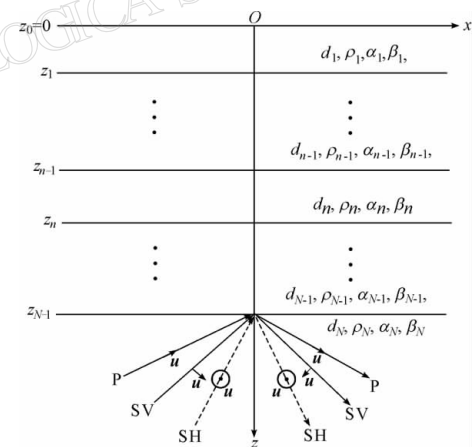


图 1 不同波型入射的水平成层模型及有关参数和正向符号规定

① 谢礼立, 周雍年, 章文波, 等. 2001. 唐山响唊局部场地条件对地震动影响观测台阵扩建和改造. 中国地震局工程力学研究所. 1-47.

表面的位移应力谱向量与第 n 层的波振幅谱向量之间的关系, 至此基本未知参量可求, 核心问题已经解决.

该研究方法可以获得各种类型的传递函数, 为反演计算提供了重要保障. 在自由地表, 可得其位移分量谱与入射波型(P, SV 和 SH)相应各分量之间传递函数; 根据入射波(或反射波)总位移谱与位移分量谱之间的角度变换关系, 又可知自由表面位移分量谱与入射 P 波、SV 波或 SH 波位移谱之比. 同理, 对于各层的反射波场与基岩弹性半空间入射波场之间, 各层的总位移场或其分量与基岩入射波场或其分量之间, 以及总位移场或其分量与基岩总位移场或其分量之间的传递函数均可获得. 类似地, 对于任意各层或深度处的应力谱之间的传递函数, 以及应力谱对于入射波、反射波、总场、以及各分量位移场传递函数也可求得.

钻井台阵记录是地表、基岩、以及两者之间某几个深度处的东西、南北、上下三分量响应. 因此, 利用各位移分量谱之间的传递函数来刻画地震记录较为便利. 如果考虑不同波型的斜入射作用, 体系响应将是由复杂 P-SV 耦合场和 SH 波场同时激励引起, 深入研究还存在不同波型到时、波型转换角度及三分量质点振动的时间及强弱等不同, 甚至需对 P-SV 波系彻底解耦(在一定条件下, 可以从成层场地三分量记录中获得斜入射 P 波、SV 波、SH 波场), 这些计算是非常复杂的. 根据地震工程学家的通常做法, 会对场地记录的整个地震动时程作统一分析, 只区分 P-SV 和 SH 两种波动机制. 本质上地震记录各分量确实是由不同波型地震动场构成. 所庆幸的是, 这 3 次地震记录有两次基本处于台站的北方、一次处于台站的西方. 而且, 根据后方位角分离出的 SH 波型总场的以往反演研究结果, 表明 SH 波的入射角很小, 因此可以假定垂直入射(垂直入射时 P 和 SV 波解耦, 且各分量记录与各波型总场相一致), 这些条件使得反演分析大大简化.

该方法的独特之处在于层转换矩阵 α 永远为实矩阵, 避免了 Haskell 传递矩阵中的复数运算, 具有元素无量纲(简单清晰), 并防止了同一矩阵中各元素数量级相差很大所产生的不稳定. 在物理模型上表现为, 在处理土层参数差别较大(如层厚、剪切波速、压缩波速等)时, 能避免有效数字的损失, 从而提高了计算的精度及稳定性. 同时, 该模型具有表述完备, 物理意义明确, 以及易于理解等特点.

另外, 采用复阻尼理论考虑该场地模型的阻尼效应, 只要将

$$\begin{cases} \beta_n^* = (1 + i\lambda_n)\beta_n & \alpha_n^* = (1 + i\lambda_n)\alpha_n \\ k_n^* = (1 - i\lambda_n)k_n & \mu_n^* = (1 + 2i\lambda_n)\mu_n \\ \lambda_n = \alpha_n f^b \end{cases} \quad (1)$$

代替原来的 β_n , α_n , k_n 和 μ_n 值. 其中, λ_n 为第 n 层介质的阻尼比, α_n 和 b 分别为阻尼系数和频率因子. 将此编制成高效、稳定的 P-SV、SH 统一表达的粘弹性波动程序 SSRA, 用于有效的反演设计.

2 反演策略——混合遗传算法

遗传算法(genetic algorithm, 简称 GA)是模拟自然界生物的优胜劣汰、自然选择和遗传变异等进化机制而形成的一种自适应全局优化概率搜索算法. Holland (1975)首次阐述了遗传算法的基本理论与方法. 其后, 很多学者对遗传算法的速度和性能加以改进. 该算法是将模型空间中的模型看作为个体, 并以一定的规模将多个个体组成群体, 通过对群体

中的个体反复实施变异、交叉和选择操作,使群体犹如生物一样不断进化,直至收敛到问题的全局最优解.与 Satoh 等(2001)采用的共轭梯度法相比,GA 不需要像共轭梯度法那样计算梯度,即不需根据目标函数的导数来确定搜索的方向和方式,因此,它具有更高的效率和自适应性,是优化分析的一种很好方法.

但是,优化方法都有其适用条件.遗传算法中个体适合度都较接近于群体最优适合度时,进化缓慢甚至停滞,常需要增加种群规模加以防制.但若群体中出现超级个体时,容易陷入局部最优值,导致过早收敛(早熟, premature convergence),这就需对 GA 加以改进.利用 GA 的大范围搜索性能与快速收敛的局部优化方法相结合是一种值得推荐的改进方式.韩伟(2000)提出将遗传算法与单纯形法结合,加强对模型空间的搜索和加快算法的收敛,取得了较好效果.本文在此基础上有机结合 SSRA 程序,进行了进一步的验证、实践和应用.

单纯形法是由 Spendley 等(1962)提出的一种不必计算目标函数梯度的多维直接搜索法,具有局部搜索能力强、操作简单、便于实现等优点.其基本思想是: n 维空间的 $n+1$ 个顶点组成一个单纯形,对顶点函数值进行比较,将数值最坏的舍弃,代之新点,而后对新建的单纯形再次分析,多次迭代后,将接近于问题极小值.

反演计算中后期,若遗传算法发生早熟或进化停止现象,则调用单纯形法,用其局部搜索结果改进现有的群体,通过多次反复调用遗传算法和单纯形法便可得到问题的全局最优解.以种群的最优个体适合度连续 20 代不发生变化作为早熟标准.

反演分析要处理好以下几个关键问题:

1) 决策变量及约束条件.即选取对传递函数敏感影响的参量,如土体剪切波速 β 、土体纵波波速 α 和阻尼比 λ ,以及其它参数如密度 ρ 、层数 N 、厚度 d 等,工程勘察和钻井资料可以可靠提供,直接采用谢礼立等(1999)的参数.

2) 目标函数与适合度.为增加其敏感性,提高土层参数的精度,目标函数直接采用理论计算波形与实际地震记录的相似性比较而非传递函数.第 j 个模型的目标函数为

$$\Phi_j = 1 - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |C_{a_i a_R}(\tau)| \quad (2)$$

式中,参数 $N=6$,代表地表(GL-00)和井下 16 m(GL-16)共 6 个分量,井下 32 m 的基岩记录是已知参量; a_i 为相应于分量 i 的强震观测记录时程.考虑正负延时的相关系数

$$C_{a_i a_j}(\tau) = \frac{\frac{1}{N-m} \sum_{n=1}^{N-m} a_i(n\Delta t) a_j[(n+m)\Delta t]}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N a_i^2(n\Delta t)} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N a_j^2(n\Delta t)}} \quad (3)$$

式中, $\tau=m\Delta t$,正向延时为 $m=0, 1, 2, \dots, N$; 负向延时只须将时程 a_i 和 a_j 对换.适合度是用来判断个体优劣的定量指标,选取

$$F_i = e^{-\Phi_i/K} / \sum_{j=1}^N e^{-\Phi_j/K} \quad (K=2) \quad (4)$$

形式(韩伟, 2000).

3) 编码与解码.将十进制模型参数转换为类似生物体染色体的二进制符号 0 和 1 为编码,反之为解码.各类参数的精度值影响二进制模型空间的大小,本文波速值精度取

0.1 m/s, 阻尼比、 b 值均取 0.005.

4) 遗传操作. 包括选择、杂交、变异和最优个体保护策略. 采用轮盘赌法进行选择操作. 杂交操作的交换概率取 0.60, 以均匀杂交方式. 变异操作的变异概率 P_m 取 0.01. 采用父代最优个体替换目前子代种群中的最差个体的保护策略.

5) 其它参数及收敛标准. 群体规模 N 经验取值为 50; 终止代数 T_{\max} 等, 根据计算速度试算取值; 若目标函数值小于预先给定的很小正数(表 2 和表 3), 认为该过程收敛; 若群体平均目标函数值已经不再变化或变化很小, 多次调用单纯形法后仍然如此, 也认为已经收敛.

3 响喹 2[#] 钻井台阵场地应用分析

图 2 是建于唐山滦县响喹乡杜峪村西南的三维场地影响观测台阵. 2[#] 钻井台阵 ($39^{\circ}41.7'N$, $118^{\circ}44'E$) 于 1994 年建成, 由 3 个测点——土层地表、井下 16 m 和井下 32 m 组成, 均由 16 位分辨率 SSR-1 型固态记录仪观测. 主机记录 GL-0m、GL-32 m, 从机记录

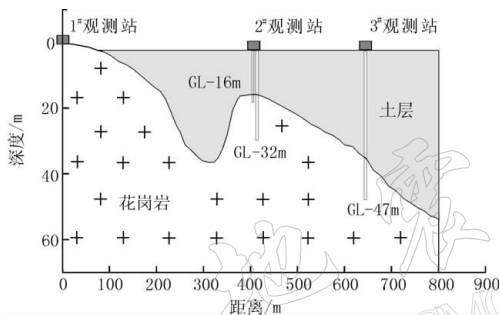


图 2 唐山响喹三维场地影响观测台阵(1994 年建)

GL-16 m, 两者同步运行(谢礼立等, 1999). 2001 年又在 2[#] 钻井台阵北北东 254 m 处新建 3[#] 钻井台阵, 并进行了现场电测深、土样动力特性试验等工作(谢礼立等, 2001). 由于 3[#] 钻井台阵土层结构非常复杂, 而强震观测只有地表和基岩两个测点, 这会导致反演参量较多, 结果难以信服等, 故未对此进行分析. 3 次地震[1994 年 10 月 4 日滦县地震 ($M_L 3.3$)、1995 年 10 月 6 日陡河东地震 ($M_L 5.9$)、1996 年 4 月 8 日滦县北($M_L 3.3$)]

的震源深度在几千米到十几千米、震中距为几十千米、地表地震动峰值为 $10.02 \times 10^{-2} \text{ m/s}^2 \sim 61.155 \times 10^{-2} \text{ m/s}^2$ 之间. 反演前滤波, 保证地震动有效频率在 15 Hz 以内, 比 Satoh 等(2001)反演分析的 10 Hz 之内已经高些.

以 1996 年 4 月 8 日滦县北($M_L 3.3$)地震为例说明 SH, P, SV 波的计算. 该地震处于 2[#] 钻井台阵的正北方, 垂直入射会使 SH、P 和 SV 波型互相独立. 地表 GL-0 m、基岩 GL-32 m 和地下 GL-16 m 记录中所有竖向位移记录均为 P 波总场(入射波和反射波两者共同作用). 同理, 所有东西向位移记录均为 SH 波总场, 南北向位移记录均为 SV 波总场(含入射波和反射波波场). 每次正演计算相当于进行 3 次, 即 P 波入射情形、SV 波入射情形和 SH 波入射情形.

模型初始化、提高参数反演精度及反演效率等, 模型参数要满足一定的取值范围(在表 1 中给出). 表 2、表 3 中分别给出了 1995 年 10 月 6 日地震、1995 年 9 月 20 日(A)、1996 年 4 月 8 日(B)的 5 次反演结果以及各种波型的相关性. 表 3 中把两次地震写在一起且只给出了 5 次反演均值结果. 图 3、图 4 分别给出了东西向和竖向反演结果与实际记录的对比. 可以发现, 相关性最强的这次(1995 年 10 月 6 日)地震的两波形很吻合. 图 5 中给出了 1994 年单孔现场波速测试结果(谢礼立等, 1999).

表 1 响嘎 2[#] 钻井台阵场地土层参数取值范围

岩 性	d/m	$\alpha/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$\beta/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$\rho/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	阻尼比 λ 中的参数 a
粉质粘土层	4.78	300~600	200~250	1 880.0	0.08~0.15
细砂及粉砂土层	2.45	400~800	220~350	2 000.0	0.08~0.15
粘土层	5.04	400~800	220~350	1 880.0	0.08~0.15
强风化黑云变粒岩	6.02	800~1 600	480~750	2 170.0	0.05~0.10
强风化花岗岩质混合岩	13.71	800~1 700	500~800	2 182.6	0.01~0.06
中风化花岗岩质混合岩		800~1 700	500~800	2 182.6	0.01~0.06

表 2 1995 年 10 月 6 日地震反演的土动力特性及相关性参数

层数	参数	反 演 次 数					均值	波型	相 关 系 数		目标函数 φ, b
		1	2	3	4	5			GL-16	GL-0	
1	β_1	234	228	226	234	238	232	SH	0.9448	-0.8836	$\varphi=0.0675$ $b=0.51$
	α_1	455	463	439	455	445	451.4	SV	0.9755	0.9195	
	a_1	0.11	0.11	0.11	0.12	0.09	0.108	P	-0.9788	-0.8925	
2	β_2	322	324	331	330	326	326.6	SH	0.9452	-0.8806	$\varphi=0.0698$ $b=0.49$
	α_2	614	630	631	629	621	624.9	SV	0.9749	0.9135	
	a_2	0.08	0.08	0.08	0.09	0.09	0.084	P	-0.9777	-0.8892	
3	β_3	309	305	302	305	299	304	SH	0.9442	-0.8825	$\varphi=0.0678$ $b=0.53$
	α_3	589	606	576	581	581	586.4	SV	0.9755	0.9181	
	a_3	0.11	0.09	0.09	0.09	0.08	0.092	P	-0.9795	-0.8933	
4	β_4	647	653	647	633	621	640.2	SH	0.9440	-0.8817	$\varphi=0.0672$ $b=0.54$
	α_4	1080	1103	1106	1082	1049	1083.9	SV	0.9758	0.9193	
	a_4	0.07	0.08	0.08	0.07	0.07	0.074	P	-0.9797	-0.8960	
5	β_5	722	714	737	735	732	728	SH	0.9454	-0.8823	$\varphi=0.0698$ $b=0.53$
	α_5	1205	1179	1230	1227	1208	1209.7	SV	0.9751	0.9129	
	a_5	0.03	0.02	0.03	0.02	0.03	0.026	P	-0.9782	-0.8872	

注：收敛精度取 0.07；值 $b \in [\pm 0.2, \pm 0.8]$ ； b 的平均值为 0.52。

表 3 1995 年 9 月 20 日(A)、1996 年 4 月 8 日(B)地震反演的土性及相关性参数

参数	A 均值 (5 层)	B 均值 (5 层)	波型	相 关 系 数				A 目标函数 φ, b	B 目标函数 φ, b
				AGL-16	AGL-0	BGL-16	BGL-0		
β_1	229	232.6	SH	0.7964	-0.5065	0.8660	-0.7517	$\varphi=0.3353$ $b=0.32$	$\varphi=0.2494$ $b=0.71$
α_1	436.5	456.2	SV	0.8249	0.6511	0.9075	0.6191		
a_1	0.104	0.110	P	-0.8629	-0.3462	-0.8032	-0.5558		
β_2	334.4	339.4	SH	0.7956	-0.5006	0.8666	-0.7625	$\varphi=0.3374$ $b=0.31$	$\varphi=0.2483$ $b=0.72$
α_2	639.8	638.1	SV	0.8248	0.6428	0.9085	0.6411		
a_2	0.10	0.100	P	-0.8660	-0.3460	-0.7976	-0.5341		
β_3	321.4	317.8	SH	0.7992	-0.5072	0.8662	-0.7533	$\varphi=0.3321$ $b=0.32$	$\varphi=0.2499$ $b=0.70$
α_3	608.9	608.0	SV	0.8301	0.6577	0.9078	0.6225		
a_3	0.096	0.098	P	-0.8663	-0.3467	-0.8002	-0.5507		
β_4	640.6	636	SH	0.7964	-0.5015	0.8657	-0.7563	$\varphi=0.3390$ $b=0.31$	$\varphi=0.2489$ $b=0.71$
α_4	1101.4	1099.1	SV	0.8245	0.6372	0.9069	0.6291		
a_4	0.086	0.086	P	-0.8636	-0.3427	-0.7995	-0.5493		
β_5	733.4	726.2	SH	0.7980	-0.5068	0.8620	-0.7485	$\varphi=0.3361$ $b=0.30$	$\varphi=0.2486$ $b=0.70$
α_5	1233.1	1218.0	SV	0.8274	0.6460	0.9063	0.6212		
a_5	0.042	0.046	P	-0.8628	-0.3423	-0.8033	-0.5672		

注：取值范围 $b \in [\pm 0.2, \pm 0.8]$ ；A 收敛精度取 0.34，B 收敛精度取 0.25； b 平均值； $b(A)=0.312$ ， $b(B)=0.708$ 。

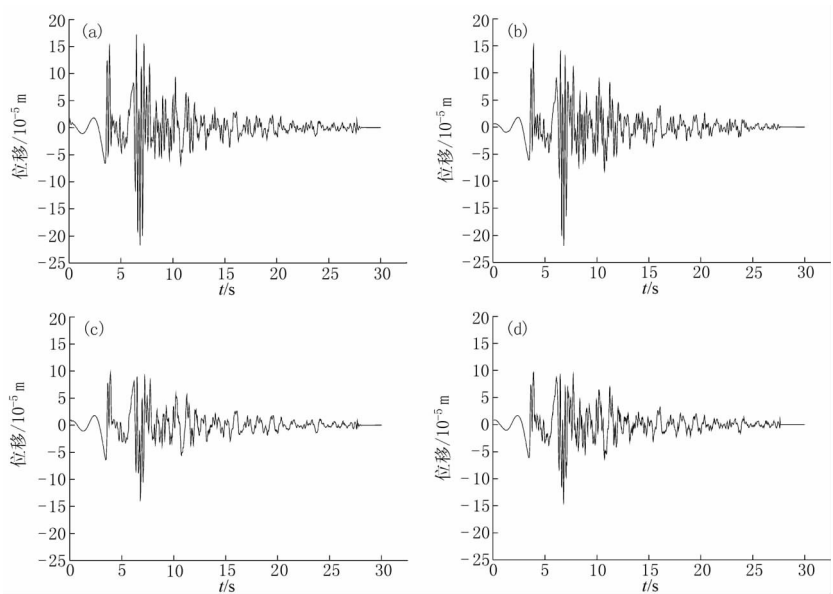


图 3 1995 年 10 月 6 日地震东西向位移反演结果与记录结果的对比
(a) 地表反演的东西向位移; (b) 地表记录的的东西向位移; (c) 地下 16 m 处反演的东西向位移; (d) 地下 16 m 处记录的的东西向位移

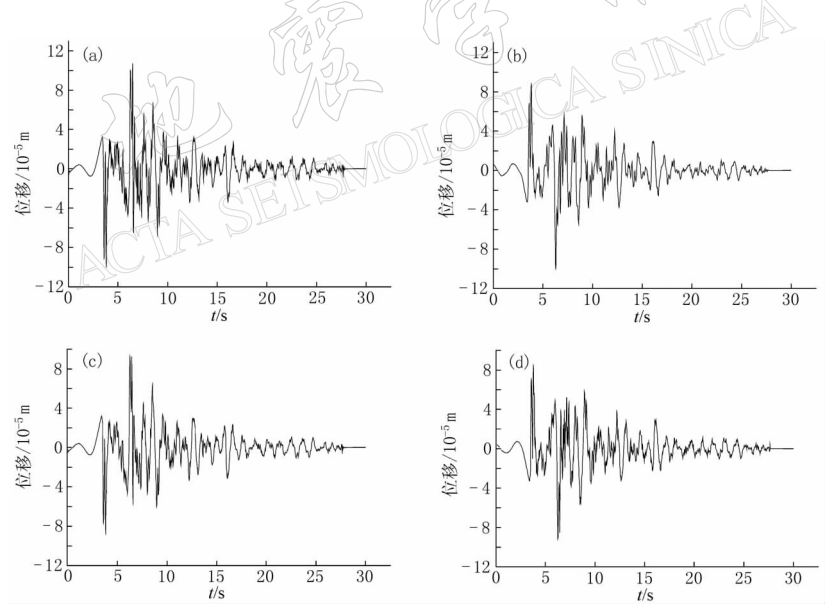


图 4 1995 年 10 月 6 日地震竖向位移反演结果与记录结果的对比
(a) 地表反演的竖向位移; (b) 地表记录的竖向位移; (c) 地下 16 m 处反演的竖向位移; (d) 地下 16 m 处记录的竖向位移

4 讨论和结论

对比表 2、表 3 并结合图 3~5，对各参数进行分析后可发现：

- 1) 通过反演方法可以得到试验没有提供的各土层的纵波波速值和阻尼比系数 a 值，

且阻尼比随着土体剪切波速或纵波波速的增加而减小。

2) 由响噏 2[#] 钻井台阵场地反演的与频率有关的阻尼系数 b 值与 Satoh 等(1997, 2001)文章中的负值结果不同, 其反演计算的 b 值均是正值. 并且发现, 该 b 值随着地震事件的不同而变化较大. 其原因可能有, 响噏场地辐射阻尼及土体各向异性的影响, 同一场地对于不同的地震事件所产生的辐射阻尼并不相同, 以及非均匀成层地形条件的影响等。

3) 由上而下的粉质粘土层、细砂及粉砂土层、粘土层、强风化黑云变粒岩层、花岗岩层的剪切波速总体均值分别为 231.2, 333.5, 314.4, 638.9 m/s 和 729.2 m/s. 可以发现, 除第一层剪切波速基本相当外, 其余各层均大于图 5 的结果, 粘土层和花岗岩层(基岩)的剪切波速相差最大, 分别大于 26% 和 32%. 而这一结果更符合谢礼立等^①提供的新井 3[#] 的剪切波速结果. 考虑到波速单孔检测法的勘察误差, 以及几年内场地土性(尤其是粘性土层)也会有所变化, 认为产生一定波速差别是可以理解的。

4) 对比表 2 和表 3 中的粉质粘土层、细砂和粉砂土层、粘土层这 3 层的纵波波速、剪切波速值, 会发现 1995 年 10 月 6 日地震反演结果确实要比 1995 年 9 月 20 日和 1996 年 4 月 8 日这两次地震的小. 这正是由于 1995 年 10 月 6 日地震的峰值加速度(如竖向达到 $61.155 \times 10^{-2} \text{ m/s}^2$)较大所致. 这正好揭示了土体非线性的影响, 即在地表峰值加速度为 $60 \times 10^{-2} \text{ m/s}^2$ 的量级, 土层动力反应中就已经产生了可察觉的土体非线性特征。

响噏 2[#] 钻井台阵反演的场地横向特征周期为 0.20 s, 传递函数幅值谱最大值为 3.80; 而竖向特征周期为 0.13 s, 传递函数最大值为 2.87. 两者高频部分传递函数值消减较快(图略). 该方法虽然是针对响噏钻井台阵, 但对于其它的钻井台阵依然适用. 另外, 场地钻井台阵记录的斜入射 P、SV 和 SH 波剥离方法, 以及 SH 波斜入射场地土体非线性参数反演分析等问题值得深入研究和探讨。

衷心感谢谢礼立院士, 周雍年、周正华、于海英研究员, 以及卢滔博士生, 特别是河北省地震局在场地资料及地震数据等方面的热忱帮助!

参 考 文 献

- 陈运泰. 1974a. 多层弹性半空间中的地震波(一)[J]. 地球物理学报, 17(1): 20-43.
 陈运泰. 1974b. 多层弹性半空间中的地震波(二)[J]. 地球物理学报, 17(3): 173-184.
 韩炜. 2000. 一种全局—局部优化算法及其在桩基承载力反演中的应用[D]: [学位论文]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所: 15-38.

^① 谢礼立, 周雍年, 章文波, 等. 2001. 唐山响噏局部场地条件对地震动影响观测台阵扩建和改造. 中国地震局工程力学研究所. 1-47.

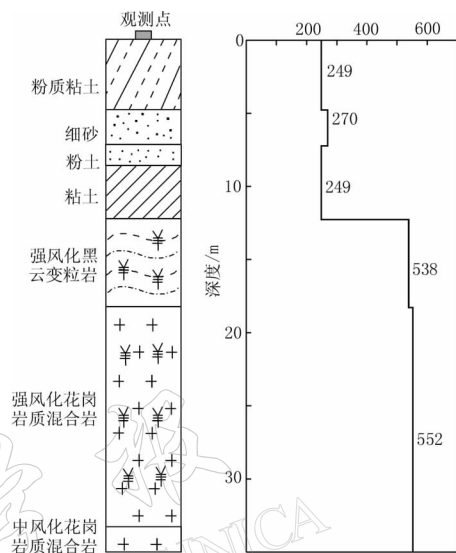


图 5 响噏 2[#] 钻井台阵的土质柱状图及剪切波速分布图

- 谢礼立, 李沙白, 章文波. 1999. 唐山响堂三维场地影响观测台阵[J]. 地震工程与工程振动, **19**(2): 1-8.
- Haskell N A. 1953. The dispersion of surface waves on multilayered media[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **43**(1): 17-34.
- Holland J H. 1975. *Adaptation in Nature and Artificial Systems*[M]. Michigan: The University of Michigan Press: 1-257.
- Ikemoto T, Miyajima M, Kitaura M. 2000. Inverse analysis of dynamic soil parameters using acceleration records[C/CD] // *12th World Conference on Earthquake Engineering*. Auckland, New Zealand: New Zealand Society for Earthquake Engineering. 1794: 1-6.
- Knopoff L. 1964. A matrix method for elastic wave problems[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **54**(2): 431-438.
- Spendley W, Hext G R, Himsworth F R. 1962. Sequential application of simplex designs in optimization and evolutionary operation[J]. *Technometrics*, **4**(4): 441-461.
- Sato T, Horike M, Takeuchi Y, *et al.* 1997. Non-linear behavior of scoria evaluated from borehole records in eastern Shizuoka prefecture, Japan[J]. *Earthq Eng Struc Dyn*, **26**: 781-795.
- Sato T, Fushimi M, Tatsumi Y. 2001. Inversion of strain-dependent nonlinear characteristics of soils using weak and strong motions observed by borehole sites in Japan[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **91**(2): 365-380.
- Thomson W T. 1950. Transmission of elastic waves through a stratified solid medium[J]. *J Appl Phys*, **21**(1): 89-93.

INVERSION OF WAVEFORMS FROM XIANGTANG BOREHOLE SEISMIC ARRAY FOR SOIL DYNAMIC PROPERTY

Chen Xueliang¹⁾ Jin Xing^{1,2)} Tao Xiaxin^{1,3)} Wei Yongxiang¹⁾

1) *Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China*

2) *Earthquake Administration of Fujian Province, Fuzhou 350003, China*

3) *Harbin Institute of Technology, Harbin 150008, China*

Abstract: In order to understand the site soil response of the Xiangtang borehole seismic array under real strong ground motion, reveal the site response, verify the technique of borehole exploration, and improve the precision of *in-situ* test and laboratory test, this paper presents a new approach, which is composed of two methods. One is the layered site seismic response method, whose layer transform matrix is always real. The other is a global-local optimization technique, which uses genetic algorithm (GA)-simplex method. An inversion of multi-component waveforms of P, SV and SH wave is carried out simultaneously. By inverting the records of three moderate and small earthquakes obtained from the Xiangtang borehole array (2[#]) site, the soil dynamic characteristic parameters, including P velocity, damping ratio and frequency-dependent coefficient *b*, which has not been given in previous literatures, are calculated. The results show that the soil S wave velocity of the Xiangtang 2[#] borehole is generally greater than that obtained from the 1994 *in-situ* test, and is close to the velocity of the 3[#] borehole, which is more than 200 m away from the 2[#] borehole. Meanwhile, perceptible soil nonlinear behavior under peak ground motion of about $60 \times 10^{-2} \text{ m/s}^2$ is detected by the inversion analysis. The presented method can be used for studying the soil response of other borehole array sites.

Key words: Xiangtang borehole array; inversion analysis; soil response; P and S wave velocity; damping ratio