

SASW 法在液化地基加固处理中的应用研究

刘松玉 方 磊 李仁民

(东南大学岩土工程研究所,南京 210096)

摘 要 介绍了 SASW 法的基本原理与测试方法,并将该方法用来评判液化地基的液化势,通过试验对比,采用 SASW 法对强夯法和挤密桩法加固液化地基的效果进行了评价,并建立了 SASW 法剪切波速与标准贯入击数之间的相关关系.

关键词 SASW;液化地基;强夯法;挤密碎石桩

分类号 TU472.36

瑞利波测试技术作为一项原位测试方法在国内外工程界受到越来越多的重视.根据激振方法的不同,该方法分为稳态和瞬态两种.所谓 SASW 法是利用瞬态激振时产生频率丰富的瑞利波,通过频谱分析,来确定传播介质的特性,因此该法又称为表面波频谱分析法(spectral analysis of surface wave).我国自 80 年代开始研究,十几年来,SASW 法在许多工程中得到了应用和发展^[1],作者近年来将 SASW 法应用于高速公路、大型桥梁工程的液化地基评价处理并取得了成功*.本文主要介绍 SASW 法的基本原理与测试方法、SASW 用于液化势评定、液化地基加固处理效果评价.

1 SASW 法的原理与方法

1.1 瑞利波传播特性

在瞬态激励下,地面将产生反射波、折射波、面波等扰动波,其中面波能量最强,约占传播总能量的 67%.瑞利波的实质是纵波与横波垂直分量在界面附近迭加放大,它能量大,传输速度低($V_r < V_s < V_p$),频率低(可以低于 0.01 Hz),衰减慢,因而信号易于提取;瑞利波的能量差不多只集中于一个波长 λ_r 左右的范围内,即在一定的深度范围内,可以选择一定的波长 λ_r ,其速度提供的信息,只在一个波长范围内,这对工程测试,深度不大时(一般在数十米范围内),显然是极为有利的;瑞利波的另一重要特征是当瑞利波在均匀介质中传播时,无频散特性.但是当瑞利波在非均匀层状介质中传播时,不同频率的瑞利波其传输速度是不同的,这种频散特性为将其应用到工程实践中提供了重要前提条件.

1.2 SASW 法基本原理与方法

现场测试方法如图 1 所示.

瑞利波沿地面传播,其穿透深度约为一个波长,同一 λ_r 的瑞利波传播特征反映了介质性

质在水平方向的变化情况,而不同 λ_r 则反映了不同深度的地下情况. 在地面上沿瑞利波传播方向以一定的道间距 Δx 设置 $(N + 1)$ 检波器,就可检测到 $(N\Delta x)$ 长度范围内的传播过程. 设瑞利波的频率是 f_i ,相邻检波器的时差为 Δt ,相位差为 $\Delta\varphi$,则相邻道 Δx 长度内 $V_r = \Delta x/\Delta t$ 或 $V_r = 2\pi f_i \Delta x/\Delta\varphi$,测量范围 $(N\Delta x)$ 内平均波速为

$$\bar{V}_r = \frac{N\Delta x}{\sum_{i=1}^N \Delta t} \text{ 或 } V_r = 2\pi f_i N\Delta x / \sum_{i=1}^N \Delta\varphi_i$$

在同一地段内测出一系列 f_i 对应的 V_r 值,就可以得到 $V_r - f$ 频散曲线,由 $\lambda_r = V_r/f$,将该曲线变换成 $V_r - \lambda_r$ 曲线. 这种曲线与地下地质条件密切相关,通过对频散曲线进行反演分析,就可得到地下某一深度范围内的地质情况及地层速度结构^[2].

瑞利波速 V_r 与剪切波速 V_s 之间有关系式

$$V_r = \frac{0.87 + 1.12\mu}{1 + \mu} V_s$$

式中, μ 为泊松比,而剪切波速与岩土动力学参数及工程性质密切相关,因此可以通过瑞利波确定各种工程力学参数,克服了以前跨孔法、反射波法的不足. 瞬态瑞利波资料处理和解释系统一般流程如图 2 所示.

2 SASW 法在液化地基处理中的应用

2.1 地基液化势评判

地基液化势评判是液化地基加固处理的基础. 以往工作中,标准贯入试验法是主要评判手段,但该方法费用高,现场施工耗时,因此该法对高速公路这样大面积液化地基评判存在明显的不足. 在江苏省连云港—徐州高速公路徐州段中采用 SASW 法进行了试验研究并与标贯试验法进行了对比. 表 1 是试验对比结果. 表中临界剪切波速 V_{scr} 采用我国《岩土工程勘察规范》(GBJ0021—94) 提供的公式

$$V_{scr} = K_s \sqrt{(d_s - 0.01d_s^2)} \quad \text{砂土}$$

$$V_{scr} = K_s \sqrt{(d_s - 0.0133d_s^2)^2} \quad \text{粉土}$$

式中, d_s 为剪切波速测点深度, m; K_s 为经验系数,本区为 7 度区,砂土取 $K_s = 92$,粉土 $K_s = 42$. 当实测剪切波速 V_s 小于 V_{scr} 时,可判为液化.

标准贯入试验法判别公式采用我国《建筑抗震设计规范》(GBJ11—89) 中推荐的公式

$$N_{cr} = N_0 [(0.9 + 0.1)(d_{sn} - d_w)] \sqrt{3/\rho_c}$$

式中, d_{sn} 为标贯点深, m; d_w 为地下水位深度, m; ρ_c 为粘粒含量, %; N_0 为基准标贯击数,徐州地区 $N_0 = 8$. 当实测标贯击数 $N_{63.5} < N_{cr}$ 时则为液化. 进一步根据液化指数 I_{L_e} 判定液化等级.

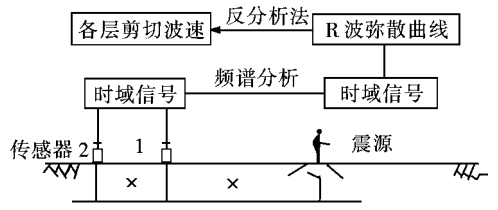


图 1 表面波谱分析法原理图

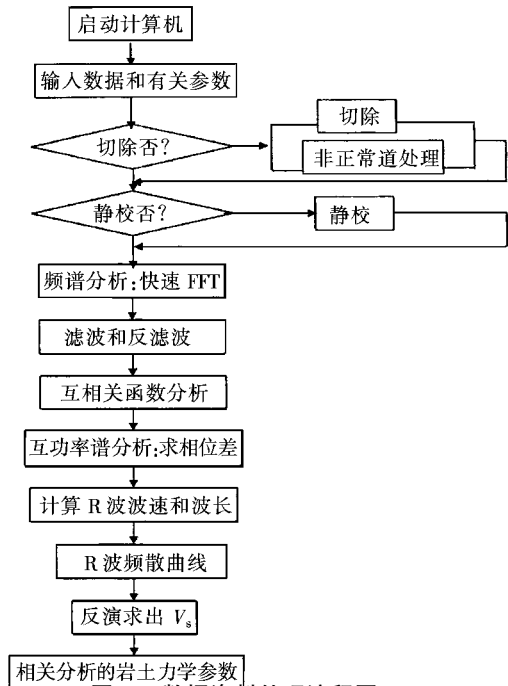


图 2 数据资料处理流程图

表 1 SASW 法与标贯法判断地基液化对比结果

孔号	土号	土类	深度/m	$N_{63.5}$	ρ_c	I_{Le}	实测 $V_r/$ ($m \cdot s^{-1}$)	$V_s/$ ($m \cdot s^{-1}$)	$V_{scr}/$ ($m \cdot s^{-1}$)	SASW 法 结果	标贯法 结果
G8	8-1	粉砂	2.5	5	5.0	4.7	108.2	116.6	135.5	液化	轻微液化
	8-2	粉土夹 粉细砂	5.4	4	5.3	26.1	89.5	96.4	142.6	液化	严重液化
G2	2-1	粉砂	2.3	4	5.0	7.7	92.1	99.2	134.9	液化	中等液化
	2-2	粉土	4.6	5	5.1	16.2	86.4	93.1	141.7	液化	严重液化
G3	3-1	粉砂	2.1	4	5.2	7.3	76.7	82.7	135.3	液化	中等液化
	3-2	粉土	4.9	5	5.0	18.4	57.3	61.7	142.5	液化	严重液化
G5	5-1	粉砂	2.6	4	5.1	6.5	106.5	114.8	136.6	液化	中等液化
	5-2	粉土	5.2	4	5.6	16.1	97.3	104.8	141.0	液化	严重液化

从表 1 可见 2 种判别方法结论一致,这为地基液化势评判提供一种更有效快捷的新方法。

2.2 液化地基加固处理评价

作者对强夯法和挤密碎石桩法加固液化地基效果的 SASW 法评价进行了试验研究,并与标准贯入试验法进行了对比。试验区位于连云港—徐州高速公路徐州段,该段地处黄河泛滥平原,地表 10 m 深度内广泛分布粉细砂、粉土等液化地基,经判定液化势以中等~严重液化为主,必须进行加固处理,并检验其效果。

2.2.1 强夯法加固效果 SASW 法评价

图 3 为 2 000 kN·m 单点夯夯前夯后 SASW 法测试结果。图 4 为 2 500 kN·m 群夯试验法测试结果。群夯试验夯点梅花形布置,夯点距 5.0 m,垫层为 80 cm 的碎石垫层,夯击 3 遍,每遍 4 击。图 5 为群夯区夯前夯后 CPT, SPT 试验结果。图 6 为强夯后不同龄期的 SASW 法测试结果。

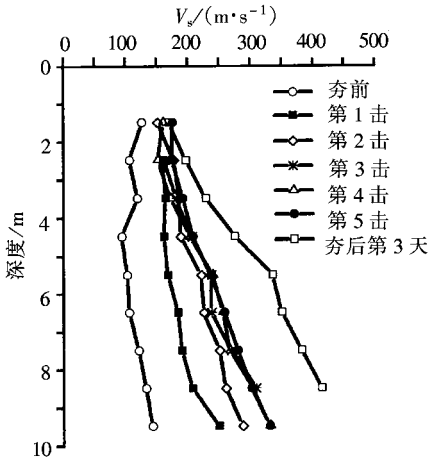


图 3 2 000 kN·m 单点夯试验剪切波速比较图

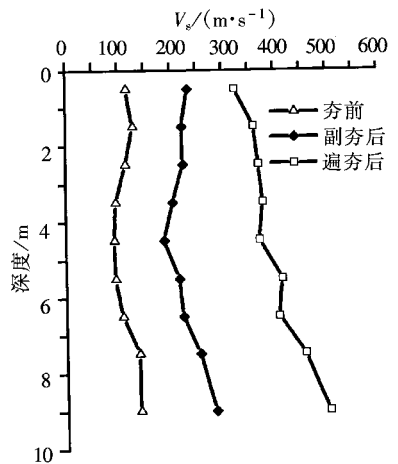
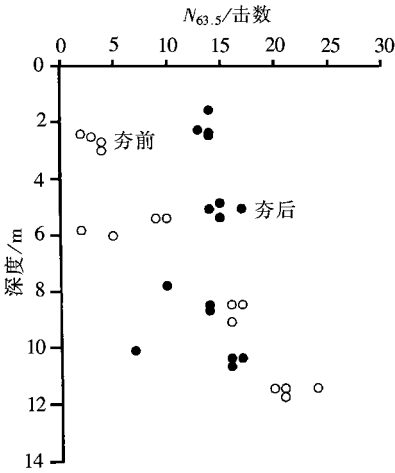


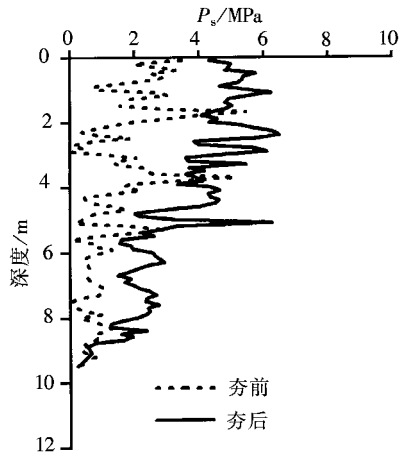
图 4 强夯后频散曲线比较(A区)

综合上述成果,得到下列认识:

- 1) SASW 法测得的剪切波速,夯前夯后有较大变化,夯后地基剪切波速 V_s 大幅提高。
- 2) 强夯过程中,每夯一击均能使地基剪切波速提高,同样群夯时副夯满夯均能提高地基剪切波速。
- 3) 不同龄期的 SASW 法测试表明,强夯后地基强度很快形成,随龄期强度增长不明显。



(a) 群夯区夯前、夯后标量试验比较



(b) 群夯区夯前、夯后 CPT 试验比较

图 5 群夯区夯前夯后 CPT, SPT 试验结果

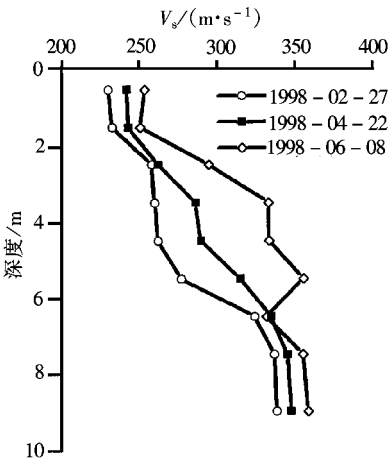


图 6 强夯后不同龄期剪切波速比较图

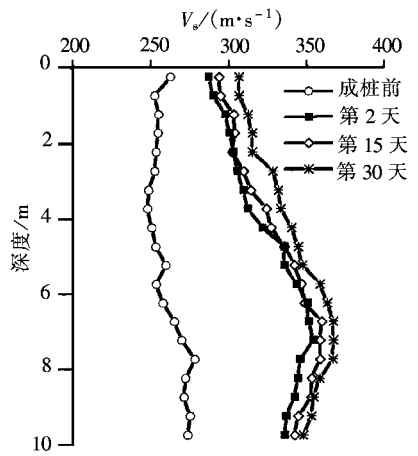


图 7 碎石成桩前后剪切波速比较图

4) SASW 法测试结果与 SPT, CPT 结果具有较好的一致性, 夯后地基均消除了液化。

2.2.2 挤密碎石桩法加固效果 SASW 法评价

试验采用沉管式干振碎石桩, 桩管直径 377 mm, 桩长 10 m, 按 1.15 充盈系数, 桩径 500 mm, 桩间距 1.6 m, 正三角形布置。图 7 为成桩前后 SASW 法测试结果, 图 8 为成桩前后桩间土的 SPT, CPT 测试结果。分析表明: ① 成桩前后, 地基土剪切波速有较大变化, 成桩后地基剪切波速大幅提高; ② 沉管干振碎石桩加固地基在其桩身中部加固效果最好; ③ 随着龄期增长, 地基土强度提高不明显; ④ SASW 法与 SPT, CPT 测试结果相吻合。

2.2.3 剪切波速与标准贯入击数的关系

标准贯入试验是评价地基土力学性质的成熟技术, 建立剪切波速 V_s 与标准贯入击数之间的相关关系具有推广应用价值。图 9 表明 SASW 法测出的剪切波速 V_s 与标准贯入击数 $N_{63.5}$ 之间具有良好的相关关系:

$$V_s = 30.2N_{63.5}^{0.92}$$

式中, V_s 为实测剪切波速, m/s; $N_{63.5}$ 为实测标准贯入击数, 击。

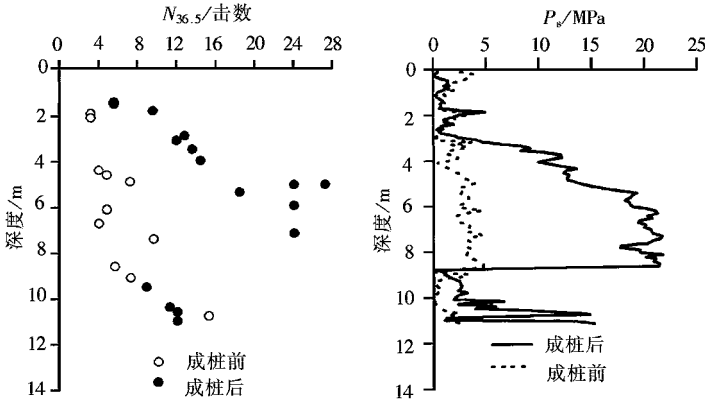
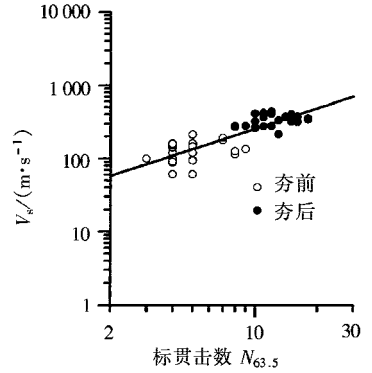


图 8 碎石桩成桩前后桩间土 SPT, CPT 测试结果

图 9 标贯击数 $N_{63.5}$ 与剪切波速相关关系图

3 结 论

1) SASW 法具有快捷、可靠的特点,是地基处理效果评价的一种新技术,特别适合于大面积地基处理评价.

2) SASW 法可以用来评价地基液化势.

3) SASW 法可用来评价强夯法、挤密桩法加固效果.

4) SASW 法测定的剪切波速与 SPT, CPT 测试结果相当吻合; V_s 与 $N_{63.5}$ 之间存在良好的相关关系.

参 考 文 献

- 1 吴洪明著. 岩土工程波动勘测技术. 北京: 水利电力出版社, 1992. 78 ~ 97
- 2 赵 东, 王光杰, 王兴泰, 等. 用遗传算法进行瑞利波反演. 物探与化探, 1995(3): 13 ~ 43

Application of SASW in Liquefiable Ground Improvement

Liu Songyu Fanglei Li Renmin

(Institute of Geotechnical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096)

Abstract: This paper presents the SASW method to evaluate the soil liquefiable and improvement techniques. The authors have done detail field tests in the Lianxu highway engineering of Jiangsu province, where the dynamic compaction and dry-vibro gravel pile are used to improve the liquefaction soil. According to the tests, SASW method is confirmed to be an effective and feasible tool for the evaluation of the soil improvement and the relationship between the the velocity V_s and the SPT blow number N is put forward.

Key words: SASW; liquefaction soil; the dynamic compaction; the gravel pile