

# 填海造陆地基强夯效果检测评价的研究

程建伟<sup>1</sup>, 杨宏宇<sup>2</sup>

(1. 温州职业技术学院, 浙江 温州 325035; 2. 青岛海洋地质研究所, 山东 青岛 266071)

**摘要:** 本文针对山东黄海造船有限公司新船体车间的填土强夯地基检测效果进行了分析评价, 该强夯地基检测采用了平板载荷试验、工程物探 (瑞雷波测试)、超重型动力触探、标准贯入试验及钻探取样等几种检测方法, 并进行了相互对比验证, 准确评价了填土强夯地基处理后的工程特性; 通过对这几种检测方法进行对比分析, 认为其中任何一种检测方法都难以准确地进行强夯地基效果的评价, 只有把平板载荷试验、工程物探 (瑞雷波测试)、超重型动力触探、标准贯入试验及钻探取样结合起来, 综合对比分析, 才能得到准确的检测结果, 才能避免单一方法检测结果的片面性, 从而准确地评价抛石填海区域强夯地基的力学特性、强夯地基有效加固深度、被加固土的物理性能及受影响的土的物理力学性质变化情况, 对类似的强夯加固地基效果评价具有一定的参考价值。

**关键词:** 平板载荷; 动力触探; 瑞雷波; 检测效果; 综合评价

**中图分类号:** TU441

**文献标识码:** B

## Reclamation of land-based dynamic evaluation of the effect of detection

Cheng Jianwei, Yang Hongyu

(1. Wenzhou Vocational & Technical College Wenzhou 325035 China)

2. Qingdao Institute of Marine Geology Qingdao 266071, China)

**Abstract:** This paper analyzes the detection effect of the fill foundation of one new ship workshop in Shandong Shipbuilding Co., Ltd using dynamic compaction. The foundation is detected using several detection methods such as plate load testing, physical exploration (Rayleigh test), super heavy dynamic penetration, SPT, drilling and sampling etc. It is found that one single detection method of the above methods can hardly evaluate the engineering characteristics of the treated foundation. Only if plate load testing, physical exploration (Rayleigh test), super heavy dynamic penetration, SPT, drilling and sampling are combined, the detection effect can be reflected accurately. The above combined detection method can not only evaluate the dynamic compacted foundation but also evaluate the effected compacted depth and its engineering characteristics. Furthermore, the above combined detection methods can be used to detect the effect of similar projects using dynamic compaction.

**Key words:** plate load testing, dynamic penetration, rayleigh wave, detection of the effect, comprehensive detection

## 0 引言

强夯法是法国 Menard 技术公司于 1969 年首创的一种地基加固方法, 它一般通过 100~400 kN 的重锤从 6~40 m 高度落下, 其冲击能一般可达 500~8000 kN·m。强夯产生的冲击波和动应力可提高地基土的强度, 降低土的压缩性, 改善砂土的抗液化条件和消除湿陷性黄土的湿陷性。同时, 强夯法可以提高土层的均匀性, 减少工后可能出现的不均匀沉降<sup>[1-3]</sup>。因此对强夯处理效果评价的准确性就显

得尤为重要, 而且一直是业主、设计单位、施工及检测单位非常重视的问题。但对强夯加固效果的夯后检测和评价方法的研究还比较薄弱, 而且, 目前强夯法还没有严密的理论分析方法, 设计时还无法对其进行精确的计算和预测。为保证施工质量, 就必须现场检测来评价施工效果。本文结合工程实践, 对各种检测方法以及评价指标进行了对比分

收稿日期: 2009-05-25 修订日期: 2009-07-15

作者简介: 程建伟 (1972—), 男 (汉族), 吉林四平人, 硕士, 副教授。

析, 为类似的强夯处理地基的检测工作提供有价值的参考。

## 1 工程概况

该工程由山东黄海造船有限公司承建, 厂房为拟建的 50 吊车新船体车间, 该车间呈长方形, 东西长 160m, 南北宽 60m。工程场地位于石岛黄海造船厂东北部开山石填海区域。现场区为新近人工填海造陆区, 场地基本平整。场地表层为回填 9m 左右的开山石, 其下为第四纪土层及基岩。根据勘探资料, 本场地地下水主要为海水, 水位受涨落潮影响, 变化较大。强夯地基采用的夯击能为 8000 kN·m, 强夯检测平面布置见图 1。

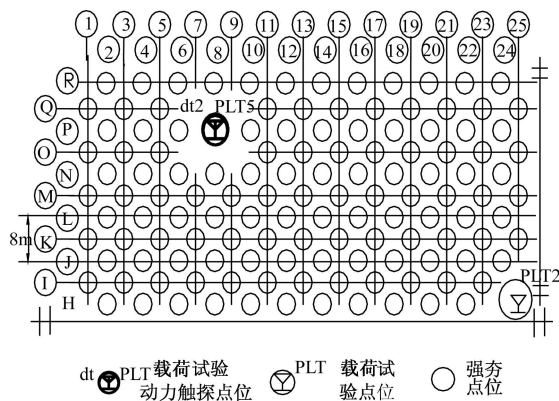


图 1 强夯地基检测点平面位置

## 2 检测的目的与方法

检测目的: 检测强夯后的地基土承载力能否满足设计承载力特征值不小于 200 kPa 的要求; 提供处理后地基变形特征; 评价加固后地基土的整体均匀性和稳定性; 确定强夯加固地基的纵向影响深度及有效加固深度。

检测方法: 针对拟建构筑物和厂区回填土特点, 本次检测采用平板载荷试验 (承压板面积为 1m<sup>2</sup>)、工程物探 (瑞雷波测试)、超重型动力触探、标准贯入试验及钻探取样相结合的方法进行了地基检测, 相互对比验证各种方法的检测结果, 从而准确评价强夯处理地基的工程特性。

## 3 强夯地基的检测方法与优劣对比

### 3.1 强夯地基的检测方法

#### 3.1.1 动力触探试验和标准贯入试验

这两种检测方法是通过测得贯入击数  $N$  的夯后值或对比夯前夯后的增长值、增长率来评价夯后地基的密实程度和判断液化趋势, 并结合经验确定地

基土工程性质指标的夯后值或夯前夯后增长值、增长率, 由此评价加固效果是否达到设计要求或计算土性指标的改善百分比。

#### 3.1.2 载荷试验

现场载荷试验是在现场通过千斤顶逐级对置于地基土上的载荷板施加荷载, 观测并记录沉降随时间的发展以及稳定时的沉降量, 将上述试验得到的各级荷载与相应的稳定沉降量绘制成  $P-s$  曲线, 根据  $P-s$  曲线确定变形模量和地基承载力, 主要的评价指标是变形模量  $E_0$  和地基承载力  $f_k$  的夯后值及夯前夯后增长值、增长率。

#### 3.1.3 瑞雷波测试

瑞雷波是一种面波, 面波是一种特殊的地震波, 它与地震勘探中常用的纵波 (P) 和横波 (S) 波不同, 是一种地滚波。在各向均匀半无限空间弹性介质表面上, 当一个圆形基础上下运动时, 由它产生的弹性波入射能量的分配率已由 Miller (1995 年) 计算出来, 即 P 波占 7%、S 波占 26%、瑞雷波占 67%。也就是说, 瑞雷波的能量占全部激振能量的 2/3, 因此利用瑞雷波作为勘探方法, 其信噪比会大大提高<sup>[4-7]</sup>。

瑞雷波具有如下主要特点<sup>[3, 6, 8, 9]</sup>:

(1) 在地震波形的记录中, 振幅和波组周期最大、频率最小、能量最强;

(2) 在不均匀介质中, 瑞雷波波速 ( $V_R$ ) 具有频散特性, 此点是面波勘探的理论基础;

(3) 由 P 波初至瑞雷波初至之间的 1/3 处为 S 波组初至, 且  $V_p$  与  $V_s$  之间具有很好的相关性, 其关系式为:

$$V_p = V_s \cdot \frac{0.87 + 1.12\nu}{1 + \nu} \quad (1)$$

式中:  $V_s$  为剪切波波速;  $\nu$  为泊松比。

此关系奠定了瑞雷波在测定岩土物理力学参数中的应用基础;

(4) 瑞雷波在多道检波器接受中具有很好的直线性, 即一致的波振同相轴;

(5) 质点运动轨迹为逆转椭圆, 且在垂直平面内运动;

(6) 瑞雷波是沿地表传播的, 且其能量主要集中在距地表一个波长 ( $\lambda_R$ ) 的范围内。

依据上述特性, 通过测定不同频率的瑞雷波速度  $V_R$ , 即可了解地质构造的有关性质并计算相应地层的动力特征参数, 达到对强夯地基效果检测的目的。

#### 3.1.4 钻探取样与室内土工试验

现场钻芯取夯前夯后的土样，在室内实验室进行土工试验，确定土的力学性质指标，通过夯前夯后土的力学性质变化的绝对值和相对值，评价强夯加固地基土的影响深度和加固效果。

### 3.2 各种检测方法的优劣对比

各种检测方法，都具有各自的优点及局限性。载荷试验得出的地基土承载力及变形结果比较真实可靠，但是只能反映在承压板直径（D）1.5倍范围内土层的力学特性，无法反应深层的加固效果，而且试验方法费时、费力，不可能应用于大规模场地的检测；动力触探可以直观地了解土层从上到下的变化情况，很快地分析出强夯地基的处理效果，但动力触探的结果受很多因素的影响，其取值的可靠性必须通过静载荷试验来验证；瑞雷波检测是一门新兴的无损探测技术，此方法可以应用于检测场地规模比较大的情况，可对强夯地基夯前与夯后效果进行定性分析，对于检测大面积的地基土的均匀性或判断土质发生明显变化的软土集中区的分布等有其优点，但影响因素也很多，需要大量的检测经验及其他方法来辅助判别，尚无法作定量分析；钻心取样与土工试验，其取样数量受费用及工期的限制，不可能太多，对大面积的场地检测也同样受限，优点是显示加固效果空间与时间的变化情况。

## 4 本工程各检测试验的成果与结论

### 4.1 平板载荷试验

本次载荷试验类型为平板载荷试验，试验目的是通过载荷试验确定地基土承载力及变形设计参数。试验仪器设备如下：试验加荷用 100 千斤顶，承压板  $1\text{m}^2$ ，百分表 4 只，油压表 60MPa，磁性力座 4 只，50 夯机一台。野外工作布置载荷试验点 5 个，分别布设在建筑物四个角点及中间点，试验过程略。

#### 4.1.1 载荷试验成果

(1) 各试验点荷载（P）—沉降（s）相关曲线绘制

我们根据单级加载 P（kPa）与相对稳定沉降量 s（mm）的实测值，绘制各试验点 P—s 原始曲线，对原始曲线进行修正后，得到各试验点 PLT 测试的 P—s 曲线图，详见图 2~图 6

(2) 各个试验点地基承载力  $f_{ak}$  的确定

根据上述 P—s 曲线分析可知，各测点试验曲线无明显的比例界限点，结合类似工程的经验，承

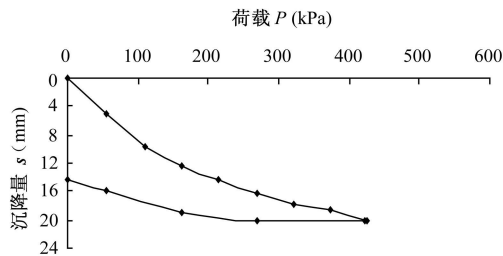


图 2 1号点 P—s 曲线

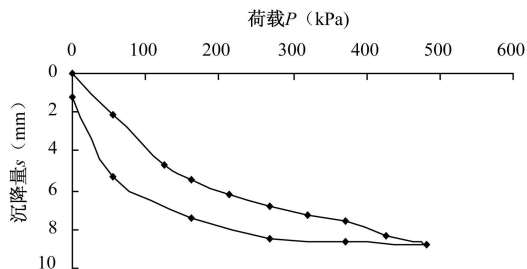


图 3 2号点 P—s 曲线

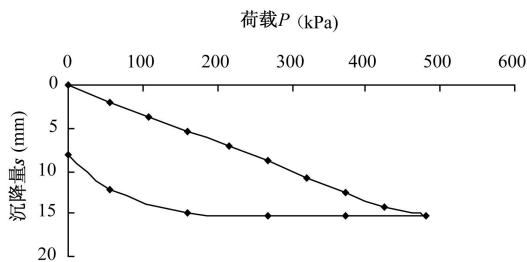


图 4 3号点 P—s 曲线

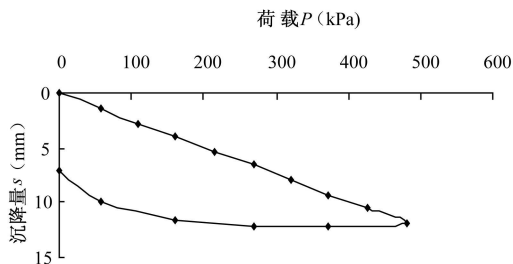


图 5 4号点 P—s 曲线

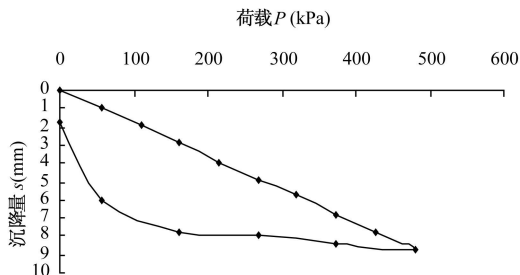


图 6 5号点 P—s 曲线

载力特征值采用相对沉降法确定，取沉降量与承压板直径比值  $s/b=0.007\sim0.01$  所对应的荷载值作为

各试验点承载力特征值, 本次 5 个试验点土层承载力特征值详见表 1。

各试验点地基土承载力特征值 表 1

点号	1	2	3	4	5	备注
承载力特征值 (kPa)	160	245	220	250	250	

### (3) 变形模量的确定

变形模量  $E_0$  按照下面的公式计算<sup>[10]</sup>:

$$E_0 = (1 - \nu^2) P / s d \quad (2)$$

式中:  $E_0$  为土的变形模量 (MPa);  $\nu$  为土的泊松比, 取 0.25;  $P$  为承压板上的总荷载 (kN), 一般按修正后的  $s = f(P)$  曲线上的直线部分取值;  $s$  为与荷载  $P$  相应的沉降量 (cm);  $d$  为承压板直径 (112.87 cm)。

将数据代入公式 (2) 求得各检测点的变形模量  $E_0$ , 见表 2。

各试验点变形模量计算结果 表 2

点号	1	2	3	4	5
变形模量	10.5	27.3	23.1	28.4	37.8

备注: 取  $s/b = 0.007$  时对应的沉降量进行计算。

## 4.2 瑞雷波测试

### 4.2.1 仪器设备及野外工作布置

本次瑞雷波测试采用的仪器为吉林大学工程技术研究所研制生产的 SE2404 E 型综合工程探测仪, 该仪器主要参数如下, 通道数: 24; 采样率:  $5 \mu s$ ;  $50 m/s$ ; 频带:  $0.1 \sim 5000 Hz$ ; A/D 运算精度: 22 bit; 前置放大器; 增益: 16/37 dB; 精度:  $\pm 1\%$ ; 波失真: 0.05%; 主处理器: Intel Pentium (80586) 266MHz。本次瑞雷波测试系统配套仪器设备有: 10Hz 瑞雷波检波器 14 个; 震源 2 个。

在拟建车间按东西向共布设三条测线, 测线间距 30m, 沿着侧线每隔 15m 布设一个测试点, 累计 36 个瑞雷波测试点, 基本覆盖了整个车间。

### 4.2.2 瑞雷波测试点位布置及原始记录

(1) 瑞雷波测试点位布置见图 7。

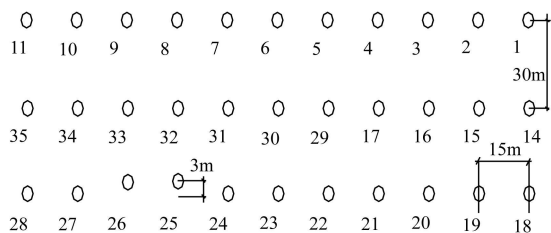


图 7 瑞雷波勘探点示意图

(2) 瑞雷波原始记录见图 8。

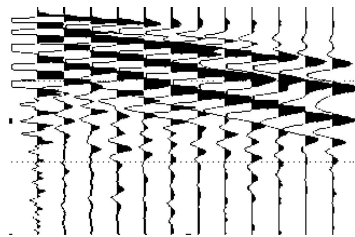


图 8 典型瑞雷波勘探原始记录

### 4.2.3 瞬态瑞雷波资料处理

(1) 瑞雷波测试成果 (文中只取 5 个点进行对比分析)

① 试夯区夯前剪切波波速成果统计, 见表 3。

② 场区夯后剪切波波速指标分层统计, 见表 4。

(2) 场地剪切波波速评价

夯前剪切波波速 表 3

孔号	力学分层深度 D (m)	单层平均剪切波速 $V_s$ (m/s)
1	0.0~5.5	155.0
	5.5~11.9	187.5
	11.9~16.6	225.0
2	0.0~3.7	156.2
	3.7~9.8	187.5
	9.8~14.5	200.0
3	0.0~4.3	167.5
	4.3~11.1	197.5
	11.1~15.8	190.0
4	0.0~5.0	165.0
	5.0~9.2	197.5
	9.2~16.6	225.0
5	0.0~5.1	175.0
	5.1~11.1	240.0
	11.1~15.1	207.5

夯前试验结果显示: 夯前场地 0~5m 深度内各点波速平均值在 155~175m/s 之间, 平均为 163.7m/s; 6~12m 深度内波速在 187.5~240m/s 之间, 平均为 202m/s; 13~20m 深度内波速在 190~225m/s 之间, 平均为 209.5m/s。夯后试验结果显示: 场地内 0~7m 深度内各点波速平均值基本在 142.5~262.5m/s 之间, 平均为 209.5m/s, 最大偏差 87.2m/s; 7~14m 深度内波速基本在 146.5~345m/s 之间, 平均为 254.9m/s, 最大偏差 108.4m/s; 14~20m 深度内波速基本在 172.5~407.5m/s 之间, 平均为 333.2m/s, 最大偏差为 160.7m/s。整个车间强夯效果较好, 表层剪切波速均大于 140m/s。

对比夯前和夯后统计结果可见, 强夯加固后场地 0~7m 深度内波速平均值较夯前提高 27.9%;

测点号	力学分层深度 D (m)	单层平均剪切波速 V <sub>s</sub> (m/s)
1	0~3.9	160
	3.9~7.9	195
	7.9~13.4	182.5
	13.4~19.2	277.5
2	0~3.0	142.5
	3.0~8.4	262.5
	8.4~13.2	217.5
	13.2~15.4	315
3	0~9.2	292.5
	9.2~11.6	255
	11.6~17.1	310
4	0~8.4	225
	8.4~11.7	292.5
	11.7~17.1	330
5	0~3.0	145
	3.0~5.9	166.2
	5.9~8.5	146.2
	3.8~7.1	280
	7.1~9.0	245
	9.0~16.2	407.5
6	0~8.4	217.5
	8.4~12.1	260
	12.1~19.2	312.5
	4.0~9.1	257.5
	9.1~13.6	345
	13.6~18.1	385

注：表中深度以地表起算。

6~12m深度内平均波速值较夯前提高 26%；因此说明强夯加固后地基土密实度增加明显。

(3) 强夯影响深度与均匀性评价

强夯后土体剪切波速提高，反映了强夯后土体被挤密加固。8000 kN/m<sup>2</sup>强夯加固影响深度在 8.5~14.6m 之间，平均值 11.5m。场地强夯后地基土波速值在 142.5~262.5m/s 之间，波速值分布整体上变化较大，应视为非均匀性地基。

4.3 钻探取样及土工试验

本次检测共进行了四个点位的动力触探试验和钻探取样工作。由于场地回填土粒径较大（碎石、块石），因此，本次钻探采用锚杆机引孔钻进，采用钻探设备对下面的土层进行取样和原位测试。从四个钻孔的钻探资料看，检测场地的岩土层可划分为 6 个土层，分别为素填土、淤泥质粉质粘土、黄褐色粉质粘土、粉细砂、粉质粗砂或粉质粘性土及花岗岩。从钻探结果来看，经过强夯的地基土层中，主要受强夯影响的土层为粉细砂层及其以上土层，影响深度为 12.9~14.0m。经过强夯后的地基土承载力及物理力学指标都有所提高。将受强夯影响较大的两层土的物理力学指标及夯前夯后标准贯入试验击数进行了对比统计，见表 5 和表 6。

从表 5 可以看出，夯后各物理力学指标中个别指标变化较大，压缩模量提高了 43.6%，天然含水率降低了 21.4%，天然孔隙比降低了 21.4%，土

强夯前与强夯后淤泥质粉质粘土物理力学指标统计

表 5

地层编号	土层名称	项目	天然含水率 w (%)	天然孔隙比 e <sub>0</sub> (%)	湿密度 (g/cm <sup>3</sup> )	液限 w <sub>L</sub>	塑限 w <sub>p</sub>	液性指数 I <sub>L</sub>	塑性指数 I <sub>p</sub>	直剪		压缩系数 a <sub>1-2</sub> (MPa <sup>-1</sup> )	压缩模量 E <sub>s1-2</sub> (MPa)
										内摩擦角 φ <sub>q</sub> (°)	粘聚力 c <sub>q</sub> (kPa)		
②	淤泥质粉质粘土	夯前	49.9	1.35	1.74	34.1	19.2	2.08	14.9	4.8	3.3	1.03	2.36
		夯后	39.2	1.05	1.84	32.2	21.3	1.64	10.9	4.6	10.0	0.60	3.39

的力学强度增加明显。另外，从该层的层顶标高来看，夯前该层层顶标高在 -4.86~-4.36m，而夯后该层层顶标高在 -4.98~-5.99m，夯后层顶标高较夯前最大低 1.63m，这充分说明强夯加固后该层受到较大影响。

强夯前与强夯后粉细砂层标贯击数对比

表 6

项目	击数最大值	击数最小值	击数平均值	变异系数
夯前	48	3.9	11.9	0.273
夯后	49	20	34.2	0.237

从表 6 可以看出，经过强夯后，该层受影响较大，原为稍密状态的土层现为密实状态，土的密实

性增大，强度提高，承载力特征值也有所提高。

5 检测成果综合分析

(1) 由载荷试验成果分析可知，2、3、4、5 号载荷试验点强夯后的地基土承载力特征值在 220 kPa~250 kPa 之间，能满足设计要求，1 号试验点的承载力特征值为 160 kPa，不能满足设计要求。分析其主要原因是，因为该地基为非均匀性地基，其物理力学性质变化较大。另外从载荷试验影响深度看，其影响深度为承压板宽度的 1.5~2 倍。因此，载荷试验的结果也不能代表整个地基土层的承载力和变形特征；

(2) 综合载荷试验与动力触探试验成果分析，

处理后地基变形模量基本在 26.8~43.8MPa之间, 变形模量较高, 压缩性较低;

(3) 综合分析动力触探试验资料及剪切波波速试验资料, 加固后地基土剪切波波速值及超重型动力触探击数较高, 说明被加固土层密实性增加。从剪切波波速值来看, 强夯后地基土波速值变化范围较大, 说明被加固土体整体为非均匀性地基;

(4) 综合剪切波速试验、标准贯入试验和土的物理力学指标试验分析可知, 受强夯影响的地基土层深度在 8.9~14.6m。综合各试验成果, 强夯有效加固深度建议按 9.5m考虑。

## 6 结语

本工程现场区为新近人工填海造陆区, 场地表层为回填 9m左右的开山石, 其下为第四纪土层及基岩。通过对本工程检测的研究, 可以得知, 对于强夯地基效果的检测, 需使用综合的检测方法, 把每种检测方法得到的结果进行对比分析和综合互补, 这样强夯效果检测评价结论才能准确可靠。一般来说, 我们利用 PLT及动力触探测试来确定地基土承载力特征值和变形模量  $E_s$ 。利用瑞雷波测试及钻探试验来确定加固土层影响深度及强夯有效加固深度。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] 禄海, 水伟厚. 强夯法有效加固深度影响因素的分析 [ J ]. 石河子大学学报, 2004, 5 ( 1 ): 345~348
- [ 2 ] 刘宏伟, 顾宏军, 庄惠平等. 瞬态瑞利波法对液化地基强夯加固效果评价与检测 [ J ]. 建筑技术开发, 2004, 31 ( 5 ): 39~41
- [ 3 ] 庞加明, 陆忠明. 瑞利波法用于复合地基加固效果监测 [ J ]. 河海大学常州分校学报, 2002, 16 ( 1 ).
- [ 4 ] 中华人民共和国行业标准. 西北电力设计院. 电力工程物探技术规定 ( DL/T5159-2002 ) [ S ]. 北京: 中国电力出版社, 2002, 121~126
- [ 5 ] 董雪华, 景鹏涛, 王西林. 瞬态瑞雷波在强夯效果监测中的应用 [ J ]. 岩土工程技术, 2003 ( 5 ): 261~264.
- [ 6 ] 中华人民共和国行业标准. 多道瞬态面波勘察技术规定 ( GJ/T43-2004 ) [ S ]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004
- [ 7 ] 陈建, 杨勇波, 张永. 瑞雷波在块石强夯地基质量检测中的应用 [ J ]. 工程地球物理学报, 2002, 2 ( 5 ): 365~368
- [ 8 ] 吴建利. 强夯地基综合检测 [ D ]. 青岛: 中国海洋大学, 2004
- [ 9 ] 杜立志. 瞬态瑞雷波勘探中的数字处理技术研究 [ D ]. 长春: 吉林大学, 2005.
- [ 10 ] 中华人民共和国行业标准. 岩土静力载荷试验规程 ( YS218-2000 ) [ S ]. 北京: 中国计划出版社, 2001, 378~380

(上接第 19页)

### 三、会议主题报告及交流

本次会议将邀请工程建设主管部门相关领导及业内知名专家、学者做大会主题报告, 本次会议将为工程技术人员提供广泛的交流机会, 本次会议还将集中展示我国边坡工程最新技术。

### 四、论文征集

本次会议会前将印刷会刊 (论文集) 作为会议资料, 论文摘要请于 2010年 1月 10日前提交, 论文全文请于 2010年 3月 20日前提交。论文字数一般不超过 6000字, 内容应包括: 论文题目、作者姓名、论文摘要、关键词、正文、主要参考文献、作者简介和联系方式等。论文请使用 word文档, 发至以下信箱 [bianpohx@126.com](mailto:bianpohx@126.com)。论文其它具体要求请参见《工程勘察》杂志网站: [www.gckc.cn](http://www.gckc.cn)

### 五、会议时间及地点

会议时间: 2010年 4月 9日 ~13日

会议地点: 四川省成都市 (具体地点将在后续通知中告知)。

### 六、会议费用

会务费为 1600元/人, 食宿、会后考察统一安排, 费用自理。

### 七、会议报名及联系方式

参加会议请尽快将回执返回会务组, 以便及时发送后续通知。

中国建筑学会工程勘察分会

联系人: 李宝玲 徐前 电话: 010-84041273 传真: 010-84025805

E-mail: [bill@geot.com.cn](mailto:bill@geot.com.cn) [qxu@geot.com.cn](mailto:qxu@geot.com.cn)

会务组联系人: 张学丽 手机: 13501370265 电话: 010-88629941 传真: 010-88629941

E-mail: [bianpohx@126.com](mailto:bianpohx@126.com) 网站查询: <http://www.geot.com.cn>

中国建筑学会工程勘察分会