

动载试验及分析在美国打入桩设计和施工中的作用

梁力群¹, 李侠², 徐晓林²

(1. Pile Dynamics, Inc., 30725 Aurora Road, Cleveland, OH 44139, USA. 2. 欧美大地仪器设备中国有限公司, 广州市广仁路1号广仁大厦16楼., 510030, 中国)

摘要: 由于打入桩具有一定的优势、如快速、灵活、易保证质量等, 在美国的深基础中应用很广泛。动载试验及分析包括高应变动测、信号拟合和波动方程分析, 可用来确定打桩应力、土阻力的恢复或松弛、及承载力的分布。很多规范规定如采用静载试验、动载试验和分析或其组合可提高荷载和抗力系数设计 (LRFD) 方法中的土抗力系数。因而动载试验及分析在美国打入桩的设计和施工中得到大量应用, 为优化设计, 监控施工质量起到很大作用。在介绍美国打入桩设计和施工的现状、使用的规范及高应变动载试验和分析的新发展的同时, 通过探讨该方法的实际使用, 来理解该方法如何减少打入桩深基础的成本、提高质量, 从而提高所支持结构的安全性。

关键词: 高应变动载试验; 信号拟合; 波动方程分析; 深基础; 承载力; CAPWAP®

中图分类号: TU 443 **文献标识码:** A

The Role of Dynamic Testing and Analysis in Current Practice of Design and Construction of Driven Pile Foundation in USA

Liqun Liang¹, Xia Li², Xiaolin Xu²

(1. Pile Dynamics, Inc., 30725 Aurora Road, Cleveland, OH 44139, USA. 2. Earth Products China Limited, 16/F, Guangren Building, No.1, Guangren Rd., Guangzhou 510030, China)

Abstract: Due to their advantages such as fast installation, flexibility, easy to control quality, etc., driven piles have been widely used as deep foundation in USA. High Strain Dynamic Load Testing and wave equation analysis can be used to determine the stresses in the pile during driving, the setup or relaxation of soil resistance and the distribution of soil resistance. If static load test, dynamic load test and wave equation analysis or the combination is used to determine the capacity, many codes and specifications allow application of higher resistance factor of LRFD. Therefore, dynamic load test and wave equation analysis are widely applied to the design and construction of driven pile foundation in USA and has been playing important role in the design optimization and quality control and assurance. The current practice of the design and construction of driven piles, commonly used codes and specifications, and the new development of dynamic load testing and analysis in USA were thoroughly discussed. The discussion on the actual practice of this method help to understand how this method can help reduce the cost and increase the quality of driven pile foundation, eventually increase the safety of the structured supported.

Keyword: High strain dynamic test; Signal matching; Wave equation analysis; Deep foundation; Pile capacity; CAPWAP

1 引言

打入桩的优点包括^[1]:

- 安装速度快, 因已成型、易于保证材料质量、横截面积和桩长。
- 灵活, 可选不同的桩型以适用于不同土况和工程条件, 如海上, 水下, 流沙层。
- 打桩过程就是测试。锤击过程中能感受到土的阻力, 所以任何打入桩可认为是“试验桩”, 便于保证承载力。
- 经济: 形状有保证 (不浪费材料)、桩长可变 (可根据测试来确定)。土恢复的利用可降低打桩费用。
- 打入桩对土的挤压不仅减少运土和清理费用, 且可改善土的承载力。

因此打入桩在美国得以广泛应用。根据美国俄亥俄 (Ohio) 州的统计^[2], 2010 年, 在高速公路桥梁项目上, 所有桩 (包括打入桩和灌注桩) 的花费约为 3.5 千万美元。其中打入桩约占 74%。考虑到俄亥俄州大于美国各州的平均值和用在其他建筑行业的桩、保守估计美国在 2010 年花在所有桩上的费用在 \$40 亿数量级。俄亥俄州用打入桩比较多、且有增加的趋势。故按 50% 算, 美国在 2010 年所有打入桩不在 20 亿美元以下。随着更多的高速公路桥梁需翻修、扩建, 桩上的花费将更多。

因此, 降低成本、提高效率、保证质量是非常重要的。要想达到这些要求, 以下三个环节非常重要:

1. 优化设计：在保证足够承载力的同时，尽量减小桩尺寸或在尺寸不变时，提高允许承载力：
- a. 通过降低安全系数（基于传统的 ASD-允许应力设计法）或增加土抗力系数（LRFD）以减少极限承载力的要求。很多规范，如 AASHTO 规范^{【3】}^{【4】}，规定系数取值与确定极限承载力的确定方法和测试的数量有关。确定打入桩极限承载力的方法有（按准确性增加的顺序）：
 - 1) 土工静力学分析（初始设计时用，很少单独使用）
 - 2) 动力公式
 - 3) 波动方程分析
 - 4) 动载测试
 - 5) 静载测试
 - b. 充分利用土恢复
 - c. 降低极限承载力将减小桩尺寸。对打入桩而言，桩尺寸的确定（横截面）需考虑最大允许打击应力和最大允许设计应力。所以在设计中考考虑到选锤有助于优化桩尺寸。
2. 提高打桩效率、保证成桩质量。即加快成桩速度、减少坏桩的修补和替换，降低了将来对结构的危险：
- a. 在打桩施工前、选择合适的锤并确定打桩操作程序以满足：
 - 1) 提供足够的锤击能量将桩贯入到设计深度或达到打桩阻力要求
 - 2) 保证打桩过程中、桩身中的应力小于最大允许打击应力以保证桩身的完整性
 - b. 在施工或打试验桩时，实施实时检测：
 - 1) 锤性能监控
 - 2) 如按拟定操作程序、应力是否能控制在要求范围内。是否需调整操作程序
 - 3) 如最终停锤准则是根据是否满足打桩阻力的要求来制定的，需确定停锤准则。一般给出对应锤击能量的锤击数或贯入度。要考虑土的恢复或松弛
 - c. 在打桩施工中，选择实时检测以保证质量
3. 复打动载试验或静载试验：可用来确定土是有恢复还是松弛，有多少，以更准确地确定长期承载力。特别在不熟悉的土况下，结果可能会影响设计。如是试验桩，这应该是设计的一部分。
- 本文就以上几点，结合例子和数据来，探讨美国打入桩的设计和施工现状，介绍桩基高应变动载试验及分析的发展动态，及在美国打入桩的设计和

施工中所扮演的重要角色。从而可看出桩基动载试验及分析是如何在保证成桩质量的同时，降低成本，提高经济效益的。

2 美国打入桩基础的设计和施工现状

美国现在常用桩包括打入桩和现场灌注桩。常用的灌注桩包括钻孔桩、螺旋钻孔桩等。常用的打入桩包括：H 型钢桩、直体钢管桩（螺旋焊接、底开口、底闭口等）、锥体钢管桩（封底、成桩后常灌注混凝土）、混凝土管桩、混凝土桩（多为方形、部分中空，多为预应力）、木桩等。打入桩在高速公路项目上用的较多，特别是中小型桥梁。根据美国俄亥俄（Ohio）州 2010 年的统计^{【2】}，在高速公路项目上打入桩的投入占 70%以上。海上项目（如天然气、油田和风电场）和海河岸项目（如码头、桥梁等）基本上用的都是打入桩。大型钢管常用于海上项目。

常用设计规范有：AASHTO^{【4】}，IBC^{【5】}，API^{【6】}，UFC 3-220-01A 深基础规范和 PDCA 规范^{【7】}等。

AASHTO 主要用于公路和运输项目。各州的运输部门（Department of Transportation 或简称 DOT）根据自身的特殊情况在 AASHTO 规范上修订出各州的规范。

海上项目多基于 API 规范。IBC 多用于民用商用建筑

2.1 允许应力设计法（ASD）

允许应力设计法是传统设计法，为下面讨论方便，简单介绍一下概念和术语。公式如下：

$$Q_u \geq f_s R_a \quad (1)$$

式中： f_s —安全系数

Q_u —单桩竖向抗压极限承载力

R_a —单桩竖向抗压允许承载力

多数情况下为满足允许沉降要求， f_s 应大于或等于 1.5。考虑到土阻力和荷载的不确定性，需要更大的安全系数。表 1 是 2007 年以前 AASHTO 的规范规定的安全系数。

表 1 AASHTO 2007 以前用 ASD 法定的安全系数
Table 1 Pre-2007 AASHTO ASD Factors of Safety

确定方法	安全系数 f_s
如做静载测试加上波动方程分析和动载测试	1.9
只做静载测试	2.0
如做动载测试加上波动方程分析	2.25
只做波动方程分析	2.75
只用动力公式	3.5

2.2 AASHTO LRFD

LRFD逐渐代替传统的允许应力设计方法。前者区分荷载有关的不确定性和阻力有关的不确定性。而后者不加区分地应用一个“安全系数”来包含所有不确定因素。LRFD的公式为：

$$\sum \eta_i \gamma_i Q_i \leq \phi R_n \quad (2)$$

式中： R_n 称作名义土抗力（Nominal Resistance）

ϕ 为抗力系数（Resistance factor）

Q_i 为第 i 种类荷载

γ_i 为荷载系数（Load factor）；

η_i 为荷载修正系数（Load modifier）；

公式左边是荷载乘以对应系数之和，即总荷载。右边和传统意义上的极限承载力一致。土抗力系数 ϕ 的取值与施工控制方法（即制定打桩准则的方法）有关。AASHTO 2014 的规定如

表 2，其中测桩数量是针对每一分组结构和每一种土况，不是针对整个项目。

表 2 2014 AASHTO LRFD 抗力系数 ϕ
Table 2 2014 AASHTO LRFD Resistance Factor ϕ

确定方法	抗力系数 ϕ
至少一个静载试验加上至少对两个（不少于 2%）工程桩进行动载试验	0.8
至少一个静载试验	0.75
对所有生工程进行动荷载测试加信号拟合	0.75
用动载测试加信号拟合来制定停锤准则，对至少 2 根（不少于 2%）工程桩动测来控制质量	0.65
仅用波动方程分析（无动载测试）或荷载测试来制定停锤准则，加上现场观察来保证锤性能	0.5
用 FHWA 修改的盖茨（Gates）动力公式制定停锤准则（仅限于初打结束时）	0.4
用 AASHTO 10.7.3.8.5 指定的工程新闻（Engineering News）动力公式制定停锤准则（仅限于初打结束时）	0.1

2.3 FHWA 的打入桩基础设计和施工手册^{【8】}

FHWA（Federal Highway Administration，美国联邦高速公路管理局）正在更新其 2006 年版打入桩基础设计和施工手册，估计 2015 年下半年能完成。该更新的主要目的是使用 LRFD 设计理念。该手册非常全面地包括了打入桩基础的设计和施工的各个方面，从地质勘察、各种静力学承载力设计方法、施工质量控制到各种软件的使用等。不仅广泛用于高速公路有关的项目、亦被其他打入桩项目使用。

2.4 PDCA 打入桩安装规范^{【7】}

PDCA（美国打桩承包商协会）亦制定了打入桩安装规范，包括不同桩的处理、设备选择和要求及承载力确定的方法。

2.5 打入桩基础设计和施工步骤及动测应用

小项目，如中小型高速公路桥梁，常只用动载试验加信号拟合。测试数量在每一基础 1 到 2 根桩，

比如在每个桥头、桥墩，各测两根桩。一般同时进行复打测试来确定长期承载力（考虑恢复和松弛）。初打结束时的测试结果可用来作为其他桩的停锤准则。

大型项目，常有设计阶段的试验方案，会包括静载测试。以下是在美国常用的打入桩基础设计和施工步骤，不一定每个项目都包含所有步骤^{【8】}^{【9】}^{【10】}：

1. 根据荷载要求、地质条件及施工环境等因素来确定基础类型，如是否要用深基础、是否要用打入桩；

2. 如确定用打入桩，要选择桩型。这要考虑单桩承载力，一般考虑 2-5 种桩型；

3. 用与当地地质条件相符合的土工静力学分析法来算出对应不同桩型、不同截面尺寸承载力沿深度的分布；

4. 确定最经济的桩型和尺寸；

5. 进行可打性分析以进一步筛选桩型

6. 考虑群桩和桩帽，及成本和其他要求

7. 准备计划、项目规范，并选定现场承载力的确定方法

8. 根据承包商提交的打桩设备进行波动方程分析、以确定：

- 设备是否合适
- 所需打桩阻力和贯入深度能达到要求的承载力

• 打桩应力满足规定

• 制定打桩准则；其形式可以是贯入深度、打桩阻力（单位锤击数）、动测结果或其组合

9. 按制定的打桩准则打试验桩或直接打工程桩，然后用以下方法来确定承载力：

- 波动方程分析
- 动载试验
- 静载试验
- 动力公式
- 以上方法的组合

动载试验可用于复打以考虑恢复或松弛。静荷载试验需准备工作，一般要等一段时间，相当于动测的复打试验。波动方程分析可考虑恢复或松弛。动力公式只用于初打结束时的土阻力估算。

10. 调整打桩准则或设计：如承载力不满足要求、需调整打桩准则。有时需调整设计，即回到第 3 步以调整尺寸，甚至重选桩型。对大项目并且地质条件不好，增加试验方案（即在设计阶段加入第 8、9 步骤）会有利于降低成本。

11. (选项) 精化波动方程分析, 即调整波动方程分析所用土模型和锤击参数以拟合观测结果。所得土模型锤参数可用于计算不满足打桩准则时的承载力, 或锤击能量有变化时的情况。

12. 打桩监控: 要保证成桩质量就要监督打桩以保证打桩准则的满足。如打桩准则不能满足, 进一步的测试如静载试验和动载试验可用来确定承载力。正式施工后、常用动载试验来确定承载力(复打), 监控打桩应力以保证桩身完整性。

2.6 UFC 3-220-01A 深基础规范

这是美国国防部属下美国工程师军团 (U. S. Army Corps of Engineers) 制定的有关深基础设计施工的规范。其中有关打桩准则的建议有一定的代表性:

- 打桩施工前, 进行初始的波动方程分析
- 打观察桩, 一般 2%到 5%的工程桩
- 用实际记录的锤性能, 调整土强度再次进行波动方程分析
- 打桩到不同深度、用 PDA (打桩分析仪) 和 CASE 方法来估计对应不同深度的承载力
- 等一段时间, 一般为一天, 复打测试
- 对动测结果进行 CAPWAP 分析, 并和波动方程分析结果比较以验证现场试验结果
- 进行静载试验以验证动测结果, 一般只用于大项目
- 如地质条件变化、荷载要求不同、桩型改变及打桩行为变化, 可要求对余下的桩进行打桩监控或复打测试

2.7 美国高速公路根据试验桩来确定打入桩准则的现状

NCHRP (National Cooperative Highway Research Program) ^[11] 针对课题“通过试验桩数据来确定工程桩的打桩准则”对美国 50 州、华盛顿特区和波多黎各的州运输局进行调查。所收集的信息显示以下几种实践:

- 基础施工没用试验桩, 打桩准则由动力公式或波动方程分析确定。此法常用于简单情况, 如打钢桩到岩层或到坚硬的土层。建议用波动方程分析, 因为可考虑更实际的桩土模型以及土恢复。
- 用试验桩, 其数量和桩型与主要选择桩型、地质条件、项目大小及各管理局的习惯有关。

- 用试验桩和高应变动载试验来确定打桩准则的办法常用于用试验桩作为工程桩的情况。结果常用来精化波动方程分析。
- 正式施工前的试验桩和高应变动载试验或静荷载试验来确定打桩准则的办法可更可靠地确定承载力。

由于各州不一样, 以下仅就几个大一点的州列举部分调查结果:

- 用波动方程确认所选打桩锤和系统是否合适的项目占百分比:
 - 加利福尼亚州 (California) 为 10%
 - 科罗拉多州 (Colorado) 为 20%
 - 路易斯安娜州 (Louisiana) 为 70%
 - 新泽西州 (New Jersey) 为 100%
- 进行复打测试的项目百分比:
 - 各州不同, 1%-95%, 选择一部分桩, 不一定在每一处进行复打测试: 科罗拉多州为 90%, 路易斯安娜州为 50%, 伊利诺伊州 (Illinois) 为 50%
 - 5%-95% 至少在每一处一根进行复打测试: 加利福尼亚州为 90%, 路易斯安娜州为 25%, 伊利诺伊州为 10%
- 荷载试验方法
 - 仅用高应变动载试验: 1% - 100%; 科罗拉多州为 100%; 加利福尼亚州为 1%; 俄亥俄为 Ohio 89%
 - 高应变动载试验加 CAPWAP[®] 分析: 5%-100%; 科罗拉多州为 20%; 加利福尼亚州为 5%; 佛罗里达州 (Florida) 为 99%; 俄亥俄为 45%
 - 只进行静荷载试验: 1% - 10%; 科罗拉多州为 <1%; 加利福尼亚州为 1%
 - 快速荷载法: < 1%

2.8 美国高速公路大直径开口打入管桩设计和荷载试验的现状

NCHRP (National Cooperative Highway Research Program) ^[12] 针对课题“高速公路大直径开口打入管桩设计和荷载试验的现状”对美国 50 州、华盛顿特区和波多黎各的州运输局进行调查, 包括混凝土管桩和钢管桩。所收集的信息显示 (作出答复的机构的百分比):

- 41%考虑用大直径开口打入桩
- 44% 用波动方程来确定打桩准则 (即打桩阻力、锤击数)

- 75% 在试验桩或选择的工程桩上进行动载试验来确定打桩阻力作为打桩准则
- 44% 在试验桩或选择的工程桩上进行静载试验或快速荷载试验、加上信号拟合来确定打桩阻力作为打桩准则
- 63% 用复打来确定阻力的变化

3 桩基高应变动载试验及分析的新发展

发明于 70 年代初期的凯斯西储大学 (Case Western Reserve University)，桩基高应变动载试验方法由 ASTM D4945^[13] 规范化。其著名的凯斯法 (CASE Method) 即由该校的名字命名。如今，实际的应用、设备已有很大发展，该方法现已成为打入桩和灌注桩的评价标准。在世界范围，成为各种规范规章指定的质量控制和保障的手段^[14]。下面是现在常用的应用动载试验来验收桩的步骤：

1. 通常使用连接到桩身上的应变仪和加速度传感器来采集锤击下桩身（常在桩顶）轴向力和速度数据，测试可以在打桩过程中或等一段时间后的复打中进行。对于均匀桩，可用应力波的传播理论和凯斯方法来计算桩身中的应力，评估桩身完整性，评估桩性能，并通过假定的阻尼系数来实时计算打桩时的土阻力 (SRD)。

2. 然后使用信号拟合软件如 CAPWAP 作进一步分析以得到更准确的总阻力和阻力沿桩身和在桩底的分布。信号拟合软件通常采用更完善的桩土模型，不仅能更精确地计算承载力，而且能计算沿桩身各点的压缩和拉伸应力。对非均匀桩和/或复杂的土条件，这一步是必要的。

大量的研究比较动载试验与静载试验^[15]。结果显示复打时动载试验的 CAPWAP 结果比较可靠。静载试验的结果与采用的破坏准则有关。通过比较 303 案例得出^[15]，CAPWAP 与基于 Davisson 准则的静载试验结果比的平均值是 0.98，协方差为 0.169。考虑到常用的 Davisson 准则结果低于所有准则的平均值，故 CAPWAP 结果可认为是偏保守的。

为适应现代动载试验的需求，其方法、运用和设备有很多更新。下面列举一些近来的新发展：

3.1 远程试验

远程测试的概念在 2000 年前出现。开始是通过电话系统，将打桩分析仪与手机通过串联接口相连，测试时通过电话连到另一端的电话或电话数据机，再通过串联接口连到计算机，该端一般是在办公室或旅馆。新的打桩分析仪运用常用的计算机操

作系统，如微软 (Microsoft) 的视窗 (Windows)，可像计算机一样操作，使通过网卡或 WIFI 直接联网成为可能。通过因特网和远程控制软件可在办公室直接操作现场的打桩分析仪。其优点如下：

- 节省旅行费用
- 省去旅行时间，既有利于安排测试以便测试更多的桩、亦能加快数据分析出报告
- 有利于防伪

该方法已被很多国家接受并利用。

3.2 快速自动信号拟合-iCAP®

传统动测的实时分析用的是基于闭合解的 CASE 方法，所得承载力的准确性取决于假设的土阻尼系数。正确的阻尼系数必须通过和静载试验或动测信号拟合分析结果比较来得到。因此好的规范（如 AASHTO, 2010）会要求作信号拟合分析。传统的信号拟合分析需较多时间，常常需回到办公室进行。另外由具有不同经验和知识的工程师来分析，结果也会不同，这是因为是非线性问题、反分析解不是唯一的，为此发展出快速自动信号拟合程序 iCAP^[16] 来自动进行快速信号拟合。其优点为：

- 快速：如桩不长（30m 内）每锤分析在 1-2 分钟内，这使得多锤分析变得可能
- 无人干涉，可减少人为因素的影响
- 能求阻力分布
- 能求应力分布，更准确地确定拉应力

当前版本的局限为：

- 限于均匀桩，木桩例外；假设直径减小率为 1/120. 不考虑衔接、间隙或裂缝
- 不适用于复杂的土模型，如辐射阻尼
- 不能进行残余应力分析

3.3 多通道及万能连接

传统打桩分析仪一般有四个通道能接两个加速度传感器和两个应变传感器，这满足大多规范的最低要求。很多情况下需安装四个以上应变传感器以保证试验的成功率，如测试灌注桩、大型管桩、螺旋焊接钢管桩及非常规使用截面形状的桩。为此而生产出八通道的打桩分析仪，四个加速度（两个压阻式，两个压电式）和四个应变传感器。最新的产品是八通道的打桩分析仪、每个通道均为万能连接，即可连接任何传感器。这就更灵活了，如：

- 6 个加速度（桩上、桩垫上和锤上各两个）
- 6 个应变传感器（桩顶、中间和桩底各两个或桩顶四个、桩底两个）

3.4 无线传感器和智能传感器

无线传感器减少传感器和数据采集分析仪之间的连线，方便测试和运输的同时亦更安全。

智能传感器储存传感器的信息，如标定参数、传感器类型。当连接到打桩分析仪（有线或无线）时，分析仪可读出传感器中的信息，从而自动识别传感器类型和输入标定参数。这不仅加快打桩分析仪的准备工作、减少错误，亦能防伪。

3.5 提供高能量的锤击设备

打入桩施工时用的打桩锤可直接用来进行高应变动载试验。这对用高应变动测监控打桩过程或确定初打结束时的承载力是没有问题的。如设计中考虑到土恢复，此时的承载力往往是达不到设计要求的。需等一段时间后复打试验来确定最终承载力。由于土恢复，土阻力增大，施工用的打桩锤有可能不足以激发所有承载力，特别是高承载力的大桩。此时需用更大锤芯的锤以提供更大的能量。当前已有 80 吨锤芯的自由落锤，可激发 8000 吨的承载力。如配上厚的桩垫，就可进行快速荷载试验。这种锤常用来测试灌注桩。

3.6 桩顶力传感器的利用

为避免应力集中影响区，一般要求传感器安装在距桩顶两倍直径以下的位置。很多情况下很难满足，如灌注桩、大直径桩、桩顶接近水面、无法开挖等。对灌注桩、桩顶周围的准备工作和桩顶的保护不容易。为此而研制出桩顶力传感器。测试时直接将力传感器放置在桩顶，略加固定以防止锤击时掉落。将加速度传感器安装在桩顶附近，就可进行试验。

3.7 水下试验

随着近年来能源工业的大力发展，海上项目如油田、天然气（中国南海）及风电场的开发前所未有。近来很多越来越大的钻进平台要安装在深海处，钢管柱常被用来固定这些平台。由于水深，合理的安装方法是水下打桩。因此对进行水下高应变试验来监控打桩过程（控制应力）和计算承载力的需求越来越多^[17]。

4 高应变动载试验及分析在美国打入桩基础中的作用

4.1 应用

涉及打入桩的现代高应变桩基动载试验及分析一般包含以下内容：

- 波动方程分析，在美国基本上用的是 GRLWEAP。
- 用打桩分析仪采集数据和用 CASE 法实时计算打桩阻力及应力的信息。
- 用信号拟合分析得到更为精确的土阻力分布及应力分布。美国基本上用的是被广泛认可和使用的 CAPWAP 软件。

波动方程分析常用来：

- 确定打桩准则，一般只是初步。
- 选择打桩设备和确认其合适性。
- 确认承载力，一般要用精化分析后的模型。精化分析可基于现场记录的打桩记录或测试结果。

对于小项目，一般没有专门的试验方案，常直接用动力公式或波动方程分析来确定打桩准则。部分会加动载试验来验证。在确定打桩准则方面，波动方程分析比动力公式有优势^[11]。根据 ASSHTO LRFD 规范（表 2），使用波动方程分析有助于提高抗力系数（ $\phi = 0.5$ 。如仅用动力公式， $\phi = 0.4$ 或更小）。

根据 NCHRP^[11] 的结论，大多数美国州运输部门认为高应变试验是有用的测试手段。具体的做法是：对每一组结构至少测一根桩，信号拟合常用来估计承载力。用这种办法来确定打桩准则的好处包括：

- 锤效率能得到不断监控。问题（如对中）能及时纠正
- 能控制打桩应力
- 能及时发现桩身损坏
- 与静载试验比，速度快、成本低
- 与波动方程分析比，估计承载力更可靠
- AASHTO 和其他机构允许用更高的抗力系数，如 $\phi = 0.65-0.75$ ，与测桩数量有关
- 复打测试很容易进行，有利于考虑土恢复或松弛

后两条可降低成本或通过更准确地确定长期承载力来提高结构的安全性。

4.2 经济效益

为研究利用测试的经济效益，Komurka 和 Arndorfer^[9]对威斯康星（Wisconsin）州运输局管辖的两个桥梁大项目进行比较。项目#1 是 Marquette 立交桥南部腿，跨度在 46m 和 78m 之间，建筑成本为 4.6 千万美元。项目#2 是运河街高架桥，跨度在 24m 和 47m 之间，建筑成本为 1.86 千万美元。

项目#1：设计和施工阶段都进行了试验。

设计阶段：5个观察区约10根钢管桩进行了试验，包括2个静载。为确定土恢复量和速度，进行了4次复打试验，等待时间为2.4小时、24小时、10天和28天以上。打桩分析仪（Pile Driving Analyzer®）用于打桩监控和复打试验。选择初打结束时和复打开始时的记录进行CAPWAP分析。花费为24.5万美元。如此全面的试验工作除了考虑该项目的规模和复杂性，还带有对土的恢复特征的研究性质，所以花费不具代表性。

施工阶段：对每一组结构基础，选1到2根桩进行高应变动测打桩监控。然后在42小时、96小时进行复打测试。从而得到土恢复的量、速度及通过CAPWAP分析得到土阻力分布。将此结果和设计阶段的邻近处试验桩的结果比较，以找出不同基础处桩身摩擦阻力恢复特征与贯入深度的关系。由测得的结果进行精化波动方程分析以得到更准确的波动方程桩土模型和锤击参数。然后可由波动方程分析确定其他桩在不同贯入深度处的打桩准则。土恢复可减小打桩阻力，如用同样的锤和桩（横截面不变），桩可打的更深。深桩有更多的摩擦阻力，可得到更多的恢复（土恢复基本上沿桩身）。最后采用的安全系数为2.25。施工阶段的试验费用为19.2万美元。

项目#2：用的是H型钢桩，没做试验，打桩准则是根据威斯康星州运输局修正的工程新闻动力公式来确定。该公式所含的安全系数在3到5之间。

支持成本定义为在深基础上所有花费除以允许荷载，即单位荷载的深基础费用。Komurka和Arndorfer^[9]用的英制吨。换算成公制吨需乘以0.9。项目#1的支持成本为30.63美元，包括试验费用；项目#2的支持费用为42.36美元。所以项目#1省了约28%。其原因除了桩型和结构的不同，与测试有关的因素如下：

- 打桩准则的确定利用了土恢复。打桩土阻力减小使打桩容易，可打更深，优化了桩长设计。
- 通过试验降低了安全系数。
- 因而，提高了单桩的允许承载力。

美国俄亥俄州在2002年后对每个项目进行动载试验^[2]。在2005和2010年之间在试验上的花费是打入桩总费用的2%。动测花费占总试验花费的91%以上。考虑到动载试验的成本更低、动载试验的数量应远超91%。通过试验不仅可降低安全系数，而且可利用土恢复。在Tuscarawas大街的3跨桥项目上，通过高应变动载试验加信号拟合达到：

- 将安全系数从2.0降低到1.53
- 由得到土阻力分布可更准确地估计流沙层需考虑的阻力损失
- 得到不同地段的土阻力恢复特征

在马萨诸塞州(Massachusetts) Brayton Point 发电厂，建闭路循环冷却塔^[18]。选择了500mm 方形预应力混凝土桩。为验证此桩型能否提供足够承载力，加入全面的试验法案，包括：

- 预打桩波动方程分析：选锤、应力控制
- 对12根桩进行动测进一步监测应力、用CAPWAP来验证承载力
- 进行了一个轴向抗压静载试验以验证设计承载力要求
- 对多桩进行了轴向抗拉静载试验和水平静载试验

通过试验，大大提高了单桩承载力，由此减少176根桩，改变了原来的设计，省了约9%（约1百万美元）的成本。该项目用了低应变试验来确定桩身完整性。

5 结语

由于其特有的优点，打入桩在美国被广泛使用。高应变动测、信号拟合和波动方程分析能确定打桩应力、土恢复或松弛及承载力。与静载试验相比，具有速度快、成本低、灵活等优点。

成桩后等一定时间进行复打测试是唯一能确定长期承载力（考虑了恢复和松弛）的方法。不仅更准确地确定长期承载力、保证结构的安全性，亦能利用土恢复特征确定打桩准则以达到优化设计的目的。

影响打桩应力的因素有：

- 桩尺寸，特别是横截面
- 锤击能量，与选用的锤和锤击过程有关
- 打桩时的阻力与土恢复有关

如已知打桩时应力，可优化桩截面以减少单桩成本，或优化单桩承载力以减少总的桩数。

测试可提高LRFD设计方法中的土抗力系数。如荷载不变，所需土阻力减少。

因此高应变动测、信号拟合和波动方程分析在美国被广泛的应用于打入桩基础的设计、试验及施工各个阶段。为打入桩更安全、更经济起到很大作用，已是打入桩设计及施工不可缺少的一部分。

参 考 文 献

- 【1】 Likins, G. E., Rausche, F., Hussein, M.H. The Role of Full Scale Testing in ASD and LRFD Driven Pile Designs. Full-Scale Testing and Foundation Design: ASCE Geo-Institute Geotechnical Special Publication No. 227; 2012; 614-629.
- 【2】 Narsavage, P. Presentation on “Ohio DOT Deep Foundation Practices Emphasizing Driven Pile”, 11th Annual Design and Installation of Cost-Efficient Piles (DICEP) conference in Orlando, FL. 2011.
- 【3】 Likins, G. E. The 2010 AASHTO LRFD Resistance Factors. PileDriver Magazine, Q2 2010; 43-51
- 【4】 AASHTO. LRFD Bridge Design Specifications. 7th Edition, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington D.C. 2014
- 【5】 IBC. International Building Code. Falls Church, VA, USA. 2012.
- 【6】 API. Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms – Working Stress Design. API Recommended Practice 2A-WSD (RP 2A-WSD), October, 2007.
- 【7】 PDCA. INSTALLATION SPECIFICATION FOR DRIVEN PILES, PDCA Specification 103-07 <http://www.piledrivers.org/pile-installation-specification-for-private-work/>. 2007
- 【8】 Hannigan, P.J., Goble, G.G., Likins, G.E., and Rausche, F. Design and Construction of Driven Pile Foundations. Vol. I and II; Nat. Highway Institute, Federal Highway Administration, US Department of Transportation, Report No. FHWA-NHI-05-042; NHI Courses No. 132021 and 132022, Washington, D.C. 2006.
- 【9】 Komurka, V.E. and Arndorfer, R.P. Driven Pile Cost Comparison for Two Large Wisconsin DOT Bridge Projects. Proceedings of the Deep Foundations Institute 34th Annual Conference on Deep Foundations: Kansas City, MO. (CD-ROM). October 2009.
- 【10】 Riahi, H.M. and Shelton, D.A. Quantico Marine Corps Base. PileDriver Magazine, Q1 2009 Vol.6, N0.1; 55-58.
- 【11】 NCHRP. Developing Production Pile Driving Criteria from Test Pile Data. Synthesis 418. A Synthesis of Highway Practice. Transportation Research Board, Washington, D.C. 2011.
- 【12】 NCHRP. Current Practices for Design and Load Testing of Large Diameter Open-End Driven Pipe Piles. 2nd Draft. A Synthesis of Highway Practice. Transportation Research Board, Washington, D.C. 2014.
- 【13】 ASTM D4945. Standard Test Method for High-Strain Dynamic Testing of Deep Foundations. American Society for Testing and Materials. Annual Book of Standards. ASTM, Philadelphia, PA, Construction Vol, 04.09. 2010.
- 【14】 Beim, G and Likins, G. Worldwide Dynamic Foundation Testing Codes and Standards. Proc. of the Eighth International Conf. on the Application of Stress Wave Theory to Piles, Lisbon, Portugal. 2008. pp 689-697.
- 【15】 Likins, G. E., Rausche, F. Correlation of CAPWAP with Static Load Tests. Proceedings of the Seventh International Conference on the Application of Stresswave Theory to Piles 2004: Petaling Jaya, Selangor, Malaysia; 2004, 153-165.
- 【16】 Likins, G. E., Liang, L., Hyatt, T. Development of Automatic Signal Matching Procedure - iCAP[®]. Proceedings from Testing and Design Methods for Deep Foundations; IS-Kanazawa: Kanazawa, Japan. 2012. 97-104.
- 【17】 Yu, W, Liang, L., Givet, R., etc. Application of High Strain Dynamic Testing Technique to Underwater Skirt Pile Foundation. Proceedings of the Twenty-third International Offshore and Polar Engineering: Anchorage, AK; 2013. pp 428-435.
- 【18】 Regan, J.E. and Bodnar, W. Brayton Point Closed Loop Cooling Towers - PDCA 2010 Project of the Year Award Winner. PileDriver Magazine, Q3 2010; 57-61