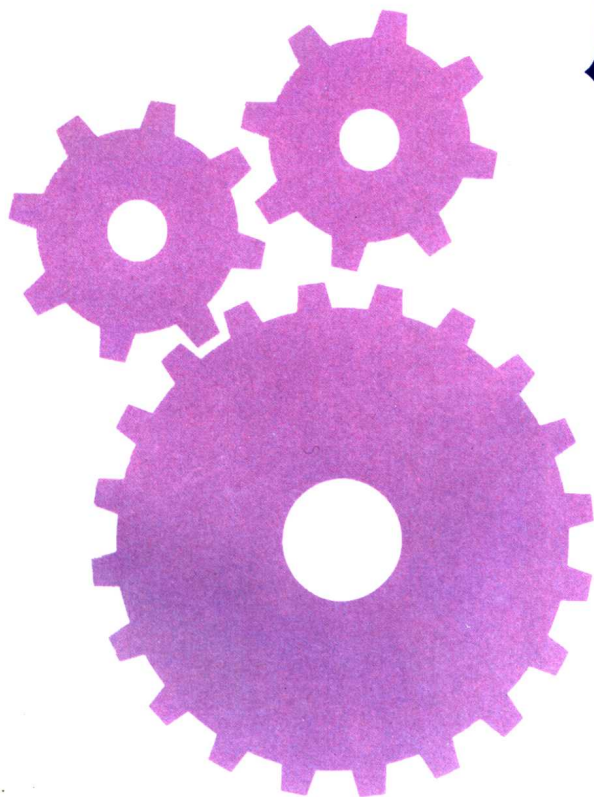


DONGLICHUTAN
SHIYANFANGFA
YU YENGYONG

石长青
张建国
陈全礼
陈平和 编著

动力触探试验方法 与应用



13.5

515

河 水 利 出 版 社

动力触探试验方法与应用

石长青 张建国 陈全礼 陈平和 编著

黄河水利出版社

图书在版编目(CIP)数据

动力触探试验方法与应用/石长青等编著. - 郑州:黄河水利出版社, 1998. 11

ISBN 7-80621-254-X

I. 动… II. 石… III. 土工试验: 动力试验: 触探试验
IV. TU413.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 33440 号

责任编辑: 邵志峰

封面设计: 郭琦

责任校对: 赵宏伟

责任印制: 常红昕

出版发行: 黄河水利出版社

(地址: 河南省郑州市顺河路黄委会综合楼 12 层 邮编: 450003)

印刷: 黄河水利委员会印刷厂

开本: 850mm × 1168mm 1/32

印张: 4

版别: 1998 年 11 月 第 1 版

印数: 1 - 1000

印次: 1998 年 11 月 郑州第 1 次印刷

字数: 99 千字

定价: 9.00 元

序

河南省水利勘测设计院从 1994 年起承担了南水北调中线南自沙河北至漳河除穿黄工程以外全长 430 公里的工程地质勘察任务,引水干渠还包括有 20 平方公里集水面积以上 70 多座河渠交叉建筑物和 320 座桥梁等工程。线路经过伏牛山和太行山山前区,分布有洪积扇、黄河高阶地和冲积平原等不同地貌。地层岩性除少量上第三系软岩外,绝大部分为黄土状粉质壤土、中、细、粉砂和大量的卵砾石地层。太行山前温县、博爱、焦作、辉县、淇县一带洪积扇绵延达 100 余公里,为勘察工作的重点地段,该段多为深厚卵石层或卵砾石及壤土互层结构。

为满足各种建筑物设计任务的需要,获取不同地层岩性的物理力学参数,进行了五千分之一的地质测绘,5 万多米进尺的钻探,数以万米计的标准贯入试验(N)和锥形动力触探试验($N_{63.5}$)。勘察工作中针对区内卵砾石地层的特点,参考了国内外卵砾石地层勘察经验,本着理论联系实际的科学精神,对锥形动力触探试验 $N_{63.5}$ 的方法作了一些改进,并用以进行紧密度分层和颗粒分层,辅以少量的现场试验,进行大型颗分、大型容重和现场竖井观察,以查明锥形动力触探试验($N_{63.5}$)成果与卵砾石层紧密度、承载力等性能之间的相互关系。此项成果,全部用于工程实际,解决了不少疑难问题,取得了较为满意的效果。

河南省水利勘测设计院石长青等同志,充分利用工作中丰富的原始资料,参阅了有关卵砾石地层勘察的规程、规范、手册以及黄委会勘测设计研究院、成都勘测设计研究院等兄弟单位的成功经验,系统而全面地进行了对比、分析、研究、总结,写成《动力触探

试验方法与应用》一书,以飨读者。

本书在基础理论研究、思路、分析方法和实际应用等方面都有较大的进步与创新,最终成果经河南省水利勘测设计院蒋甫南和黄委会勘测设计研究院乔来禄两位总工等同志的慎重审查与修改,系统而简明,实用性很强。

本书在南水北调中线工程地质勘察中做出了应有的贡献,反映了河南省水利勘测设计院不断提高的技术水平。为动力触探试验方法与应用有进一步的改善与发展,为水利工程建设取得更大的成绩,希望广大工程地质工作者、教师和研究生们系统了解这一领域的新进展,并对编写中的疏漏、不当之处不吝指正。

張興仁

1998年10月于天津

序

工程地质勘察中有一项指标测试(Index Test),即用简便易行的手段对地基进行有控制性的空间剖析,藉以圈定不同力学强度地质单元的性状和大致分布,以便进一步查明各(岩)土体单元的物理力学参数。

动力触探就是指标测试的一种重要方法,它已经在世界各地广泛应用了将近半个世纪,积累了丰富的工程实践经验,包括这种方法的标准化以及触探击数与(岩)土体密度、强度、承载力、变形模量之间相互关系的渐趋成熟。这种方法的突出优点,不仅在于其设备简单、操作方便、勘察周期短、造价较低,而且在于其所获成果具有较强的应用性和较好的可信度。

对于标准贯入试验(S.P.T),50年代初期我们就应用了,开始是用麻绳和人拉锤,60年代初改为钢丝绳和自动落锤,在粘土、壤土和砂层中广泛使用,取得了很好的效果。在河南省近百座大中型水库和水闸工程建设中发挥了积极的作用,同时也积累了许多经验。对于重型(63.5kg)圆锥形动力触探(D.P.T)的使用还是近年来的事,它适用于砾卵石、碎石土地基。对于此种地基的勘察一向被认为是难题,例如黄河小浪底水库、淇河盘石水库坝基砾卵石层的强度和变形问题曾作过许多探索和研究。南水北调中线总干渠经过伏牛山、太行山山前洪积扇及跨越诸多交叉河道,砾卵石、碎石土地基成为突出的工程地质问题之一。我们在此类地基上作了近万米锥形动力触探试验,积累了大量资料,经过分析、对比和应用,也取得了不少经验。我们使用的动力触探只限于 $N_{63.5}$

和 N_{120} 两种,主要还是 $N_{63.5}$ 。

关于动力触探试验的正确方法和标准化问题,应该引起高度重视。前年我向中国科学院、中国工程院院士汪闻韶先生请教南水北调中线穿沁建筑物细砂地基抗震问题时,他详细询问了触探的操作过程,从而对触探成果的可信度作了些判断。汪先生十分重视触探方法,例如孔径、孔深、护壁方法、用的是钢丝绳还是麻绳,操作是否认真等等,他以为这些都可能影响到成果。我与他接触多次,他总是这样对待触探。河南省某水库坝基中、细砂触探成果曾因操作不恰当而报废返工。触探方法的正确和标准程度将直接影响其成果的可信度,这是不容置疑的。因此,我们在工作过程中对于动力触探方法及其影响因素极为重视,并作过许多探索和对比分析,积累了一些经验。

通过大量的工程实践,本书编著人花费了一番心血把这些方法和应用方面的知识 with 经验归纳起来,使之条理化、具体化、系统化。这无疑将大大有助于实际工作和深入探讨。推荐同行们借鉴参考。

蒋甫南

1998年9月20日于郑州

前 言

动力触探试验是一种地基土现场原位测试技术,它具有设备简单、操作方便、成本低、效率高、用途广等优点,越来越受到岩土工程界的重视,国内外的许多规范已将其列为确定地基设计参数的方法之一。尽管动力触探试验的影响因素较多,指标的离散度有时较大,但只要正确运用,并与其它勘察手段配合使用,仍能取得令人满意的结果。

本书汇编了国内外许多单位以往的实践经验和最新科研成果,主要有《工程地质手册》(第三版)、《岩土工程手册》、《动力触探》(周筱宾编)、《岩土工程试验监测手册》(林宗元主编)等,同时总结我们多年来的大量实践资料,对动力触探试验的经验作较为系统的整理、分析和研究,以供从事岩土工程勘察的同志参考使用,并促进该项技术进一步发展。

由于编者水平有限,书中缺点、错误在所难免,希望读者批评指正。

书稿承蒙中国地质大学(武汉)蒋甫南客座教授(教授级高级工程师)、水利部黄委会勘测规划设计研究院乔来禄教授级高级工程师、华北水利水电学院岩土工程系主任刘汉东教授、河南省水利勘测设计院曲书明高级工程师审阅,并提出宝贵意见,在此表示衷心感谢!另外,还要感谢本书所引用的图书和资料的编著者。

编著者

1998年4月

目 录

概论	(1)
1 基本原理	(5)
1.1 牛顿碰撞理论	(6)
1.2 弹性波动理论	(7)
2 试验设备	(10)
2.1 国外动力触探的分类及设备	(10)
2.2 中国动力触探的分类及设备	(15)
3 试验方法	(17)
3.1 试验步骤	(17)
3.2 注意事项	(18)
3.3 记录格式	(19)
4 影响因素	(21)
4.1 人为因素	(21)
4.2 设备因素	(23)
4.3 其它影响因素	(23)
4.4 需分析研究的影响因素	(23)
5 资料整理	(34)
5.1 触探指标	(34)
5.2 力学分层	(39)
5.3 触探击数平均值	(40)
6 动力触探试验成果的应用	(43)
6.1 确定砂土和砾石类土的密实度及孔隙比	(43)
6.2 确定地基土的承载力和变形模量	(45)
6.3 确定单桩承载力标准值 R_k	(54)

6.4	评价场地的均匀性·····	(62)
6.5	其它类型动力触探·····	(62)
7	标准贯入试验·····	(68)
7.1	概述·····	(68)
7.2	仪器设备·····	(69)
7.3	试验方法·····	(71)
7.4	影响因素·····	(78)
7.5	资料整理·····	(87)
7.6	成果应用·····	(89)
7.7	标准贯入试验成果与静力触探、动力触探及 波速法成果的关系 ·····	(108)
7.8	检验地基加固的质量 ·····	(112)
	结束语·····	(115)

概 论

为了发展我国的勘察事业,提高勘察技术和经济效益,确保工程质量,使勘察工作更好地为“四化建设”服务,更好地响应国家倡导的岩土工程体制,尽早地与国际市场接轨,动力触探试验作为一种经济、简便、直观、准确的土工原位测试方法;愈来愈受到岩土工程界的重视。

岩土工程的技术业务范围很广,涉及到土木工程建设过程中所有与岩体和土体有关的工程技术问题,因而动力触探试验涉及的行业也相当广泛,如城建、水利、电力、核工业、地矿、煤炭、石油、化工、交通、机械、冶金、有色金属、国防等。

动力触探试验(DPT. Dynamic Penetration Test, Dynamic Sounding)是用一定质量的重锤,以一定的自由落距将标准的圆锥形探头或贯入器打入土中,根据打入土中一定深度所需的击数,判定土的性质的一种原位试验方法。

通常以打入土中一定距离所需的锤击数来表示土的阻抗,故有时亦称贯入阻抗。

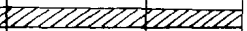
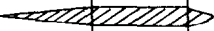
动力触探试验的特点是直观、快捷,其优点是设备简单、操作简易、工效较高、适用性广,而且在贯入过程中能连续测定土的性质。对难以取样的无粘性土(砂土、碎石类土等)、对静力触探难以贯入的土层,动力触探试验是十分有效的勘探测试手段,因而得到了工程勘察界的广泛应用和高度重视。

动力触探试验指标主要用于以下几个目的:

- (1) 评定砂土的天然孔隙比或相对密实度,粘性土的天然状态。
- (2) 估算土的强度、变形模量及承载力。
- (3) 评定场地地基土的均匀性。

- (4) 探查土洞、滑动面、软硬土层界面等。
- (5) 确定桩基持力层部位和单桩承载力。
- (6) 检验地基加固与改良的质量效果。

动力触探试验适用于强风化、全风化的硬质岩石及各类土,其适用范围如下图。

类 型	粘性土		粉	砂 土						碎石土 (无胶结)			岩 石
	粘土	粉质粘土	土	粉砂	细砂	中砂	粗砂	砾砂		圆砾 角砾	卵石 碎石	漂石 块石	全、强风化
轻 型													
重 型													
超重型													

图例  用于确定地基承载力基本值和变形模量

 用于划分土的力学分层,评价土层的均匀程度

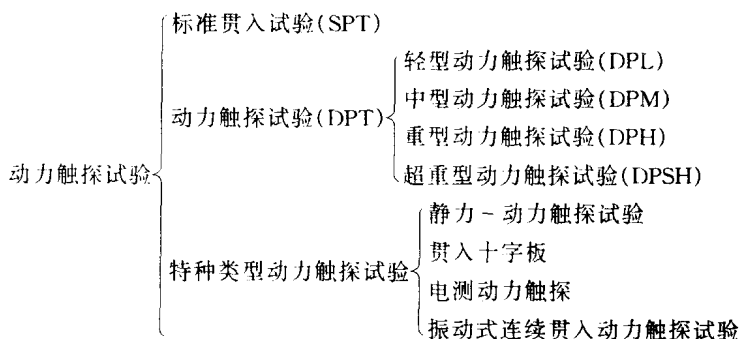
动力触探适用范围图

动力触探试验在国内外应用极其广泛,主要包括标准贯入试验、动力触探试验和其它。按穿心锤的重量又将动力触探试验分为轻型($\leq 10\text{kg}$)、中型($10\text{kg} \sim 40\text{kg}$)、重型($40\text{kg} \sim 60\text{kg}$)和超重型($> 60\text{kg}$)。详细分类见下图。

我国国标《岩土工程勘察规范》(GB50021-94)、水利电力部《土工试验规程》(SD128-86)等技术标准,将动力触探试验分为轻型($10 \pm 0.2\text{kg}$)、重型($63.5 \pm 0.5\text{kg}$)和超重型($120 \pm 1\text{kg}$)三种。

标准贯入试验实质上是采用空心圆筒形探头的一种特殊动力触探试验,因其应用了半个多世纪,积累资料很多,故国内外有关

规范、规程和手册常将其单列, 本书也将其单列, 详见第 7 部分论述。



动力触探试验分类图

根据工程实践, 我们认为: 轻型动力触探(DPL)适用于平原区工业与民用建筑地基勘探与测试, 重型动力触探(DPH)广泛应用于粒径小于 80mm 的卵砾石地层测试, 超重型动力触探(DPSH)适用于卵石地层测试。

特种类型动力触探见下表, 以适应使用不同目的的需要。

特种类型动力触探汇总表

类 型	特 点
静力—动力触探	能较好地解决当静力触探无法通过地层时, 改用动力触探, 待穿过硬层时, 又用静力触探, 扩大了静力触探的使用范围
贯入十字板	既可作为动力触探贯入, 又可在需要的深度做十字板试验, 一机两用
电测动力触探	用传感器量测动贯入阻力, 提高了触探指标的精度
振动式连续贯入动力触探	连续、快速测试砂层液化阻力, 克服标准贯入试验的一些缺点

国外自 1957 年第四届以来的历届国际土力学与基础工程 (ICSMFE) 会议, 以及 1974 年、1982 年两届欧洲触探 (ESOFT) 会议的论文、报告, 都说明动力触探方法仍是有效的方法。欧洲一些国家十多年来已相继制订或修订了全欧或国家的动力触探试验标准。

我国在 40 年代末就引进了标准贯入试验, 50 年代初南京水利实验处就自制了标准贯入试验设备并应用于工程地质的勘测中, 例如治淮总指挥部的标准贯入试验、北京市勘察处的轻型动力触探 (钎探)、冶金工业部黑色冶金设计研究总院的中型动力触探 (N_{28} , 即锤的质量为 28kg, 落距 0.80m, 探头直径 61.8mm, 截面积 30cm^2)、原第一机械工业部勘测公司的重型动力触探等。根据工程实践中积累的大量经验, 我国 70 年代编制的《工业与民用建筑地基基础设计规范》(TJ7-74) 和《工业与民用建筑工程地质勘察规范》(TJ21-77) 都已将动力触探试验正式列入作为评价地基土的一种有效方法。在此以后, 我国建设部、水利电力部、铁道部、冶金部、有色金属工业总公司、交通部等部门相继制订的国家标准、行业标准、规范和规程, 均将动力触探试验正式列入。

80 年代以来, 我国的勘察设计单位在实际应用中又有了新的补充和发展, 表现在: 动力触探试验已成为粗粒土勘察测试的主要手段之一; 在确定碎石土的容许承载力方面又积累了新的经验, 开始应用超重型动力触探试验和采用电测探头; 对动力触探试验的影响因素也有了新的研究。

1 基本原理

动力触探试验的贯入能力可由能量指数 n_d 来衡量:

$$n_d = \frac{QgH}{A} \quad (1-1)$$

式中: n_d ——能量指数, J/cm^2 ;

Q ——锤的质量, kg ;

g ——重力加速度, m/s^2 ;

H ——锤的落距, m ;

A ——探头横截面积, m^2 。

能量指数愈大, 动力触探的贯入能力就愈大。

动力触探的锤击能量为 eQH (e 为锤击效率), 涉及落锤方式、导杆摩擦、锤击偏心等), 即一部分能量消耗于锤与触探杆的碰撞、探杆的弹性变形、探杆与孔壁土的摩擦等, 另一部分能量是用于克服土对探头贯入的阻力。前者为无效能量, 后者为有效能量。如略去无效能量, 则:

$$eQH = R_d \cdot A \cdot S \quad (1-2)$$

式中: e ——锤击效率;

R_d ——探头的单位动阻力, N/m^2 ;

S ——每击的贯入度, m , $S = \frac{h}{N}$ (h 为贯入深度, N 为贯入深度为 h 时的锤击数);

Q 、 H 、 A 的意义同前。

$$\text{则} \quad R_d = eQH \frac{1}{A \cdot h} \cdot N \quad (1-3)$$

当 eQH 、 A 、 h 一定时, $R_d = aN$; 即 N 的大小, 反映了土层的动贯入阻力, 它与土层的紧密程度、力学指标等有联系。

动力触探试验亦可用牛顿碰撞理论和波在弹性介质中的传递理论进行分析。

1.1 牛顿碰撞理论

设有两个运动的弹性体,质量分别为 m_1 及 m_2 ,在碰撞前,运动速度分别为 u_1 及 u_2 ;碰撞后,两物体的速度变为 v_1 及 v_2 ,则:

$$\begin{cases} m_1(v_1 - u_1) = -m_2(v_2 - u_2) \\ \lambda = \frac{v_2 - v_1}{u_1 - u_2} \end{cases} \quad (1-4)$$

式中: λ ——碰撞恢复系数。

由式(1-4)可得:

$$\begin{cases} v_1 = \frac{(m_1 - \lambda m_2)u_1 + (1 + \lambda)m_2 u_2}{m_1 + m_2} \\ v_2 = \frac{(1 + \lambda)m_1 u_1 + (m_2 - \lambda m_1)u_2}{m_1 + m_2} \end{cases} \quad (1-5)$$

当用于动力触探时,令锤的质量为 m_1 ,探杆质量为 m_2 ,碰撞前锤的下落速度 $u_1 = \sqrt{2egH}$;而探杆在碰撞前的速度 $u_2 = 0$,则式(1-5)变为:

$$\begin{cases} v_1 = \frac{(m_1 - \lambda m_2)u_1}{m_1 + m_2} = \frac{m_1 - \lambda m_2}{m_1 + m_2} \sqrt{2egH} \\ v_2 = \frac{(1 + \lambda)m_1 u_1}{m_1 + m_2} = \frac{m_1}{m_1 + m_2} (1 + \lambda) \sqrt{2egH} \end{cases} \quad (1-6)$$

(1)De Mello(1971)认为,探杆碰撞后的动能为有效能量,为 $\frac{1}{2} m_2 v_2^2$,则:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} m_2 v_2^2 &= \frac{1}{2} \frac{m_1^2 m_2}{(m_1 + m_2)^2} (1 + \lambda)^2 2egH \\ &= (egH \cdot m_1) \frac{m_1 m_2}{(m_1 + m_2)^2} (1 + \lambda)^2 \end{aligned} \quad (1-7)$$

当锤与钢探杆碰撞, $\lambda = \frac{5}{9} (\approx 0.55)$, $(1 + \lambda)^2 = 2.41$ 。对于自由落锤 $e \approx 0.99$ 。而 $\frac{m_1 m_2}{(m_1 + m_2)^2}$ 项则与杆长有关(因 m_2 与杆长有关), 可称为杆长系数。

(2) 考虑探杆碰撞后的动能与锤碰撞后的动能之和为有效能量, 则:

$$\frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2 = \frac{1}{2} m_1 u_1^2 \left(\frac{m_1 + \lambda^2 m_2}{m_1 + m_2} \right) \quad (1-8)$$

(3) 考虑锤与探杆的碰撞为非弹性碰撞, 即当贯入土层为软弱土层时, 锤与杆件碰撞后以同一速度 v 运动, 则:

$$m_1 u_1 = (m_1 + m_2) v \quad (1-9)$$

碰撞后锤与杆件的动能为有效能量:

$$\frac{1}{2} (m_1 + m_2) v^2 = \frac{1}{2} m_1 u_1^2 \frac{m_1}{m_1 + m_2} \quad (1-10)$$

(4) 考虑有效能量时, 除锤与探杆的动能外, 还包括锤与探杆在贯入过程中重心降低所提供的能量在内。设贯入深度为 30cm, 锤与杆件贯入土中的贯入度为 S , 而:

$$S = \frac{30}{N} \quad (1-11)$$

锤与探杆的位能降低为 $(m_1 + m_2) \frac{30}{N}$, 则在式(1-8)、式(1-10)中均应加上 $(m_1 + m_2) \frac{30}{N}$ 项。

当 N 愈大, 这部分能量不大, 可略去; 当土层软弱, N 不大时, 这部分能量占有相当的比例, 应予以考虑。

1.2 弹性波动理论

由弹性力学得知, 两物体碰撞时, 在碰撞处产生一个压缩波。