

超声地震模型试验在甬江隧道水底 基础质量检测中的应用^{*}

杨钢宇¹⁾ 郭铁栓²⁾ 李金龙¹⁾ 杨导声¹⁾

1) 中国杭州 310013 浙江省地震局

2) 中国北京 100036 国家地震局分析预报中心

摘要 超声地震模型试验工作,作为工程多波地震勘探的重要手段,已被用于解决复杂的工程质量检测。本文介绍了这一技术在甬江隧道水底基础质量检测中的应用。研究模型的材料取材于施工现场,其实验结果成功地用于现场检测中。

主题词 超声地震模型试验 工程多波地震勘探 管段注浆工艺

引言

工程多波地震勘探是近几年新提出的工程动测新理论(赵鸿儒,郭铁栓,1994),它主要包括:地震模型试验,岩石综合物性测定和全波震相分析等在工程地震勘察中的综合应用。这一新理论、方法和技术在解决复杂工程地震勘探问题中已取得显著成效。例如,在甬江隧道水底基础质量检测工作中得到了很好的应用。

甬江隧道位于浙江宁波市老区 17 km 的甬江下游。隧道渡越工程采用沉管法施工。沉管又称为隧道管段(外套钢管的水泥管),为隧道的主体。施工时,先在岸上分段预制好管段,然后分段沉入江底连接成隧道。这种施工工艺在我国尚属首次。管段的水底基础处理,采用开槽、抛石、由管段内预制的注浆孔向下注浆的新工艺。水底基础注浆质量关系到隧道管段的稳定,需要准确地检测。这一检测工作在国内是第一次,也是国际上急待解决的难题。检测技术工作的困难在于:①隧道的水底基础注浆处理属隐蔽性工程,注浆情况无法直接观察;②管段沉放注浆后,整体结构复杂,为多种不同介质组成的小尺度不均匀构造;③管段的底部和基础是一个负速度模型;④江水和淤泥等流动性的干扰;⑤工程的特殊要求,只允许在管内表面上设法进行检测工作。面对这样一个工程检测难题,我们采用了工程多波地震勘探方法,成功地解决了这一难题。检测的结果包括注浆层和抛石层的质量、厚度分层状态和强度。工程多波地震勘探者认为,对这种前人未作的复杂工程问题,应首先通过模型实验研究取得好的结果,再应用于现场指导实施。本文就有关超声地震模型试验在该工作中的应用作一介绍。

* 1995-12-27 收到初稿, 1996-03-04 收到修改稿并决定采用

1 超声地震模型和实验结果

超声波地震模型模拟技术在 50 年代始于国外，70 年代得到很大发展。我国从 70 年代末，以北京大学地球物理系为主，进行了一系列系统研究，使这一技术在我国得到长足进步（赵鸿儒等，1986）。除地震波的基础理论研究外，还将这一技术用于解决工程难题，如在研究煤层陷落柱、场地土层波速测量、高速公路路面质量检测以及桩基测试等方面都得到了应用，并取得良好效果。

超声波地震模型模拟技术的基本原理是，超声波的波长远小于工程地震勘探或其它地震波检测方法所用的实际地震波的波长，因此根据无量纲波动方程的不变性，可以用远小于实际研究检测原型的小尺度模型来研究解决实际问题，并将所得的结论推论到实际观测中。这种研究技术的优点是，在已知模型条件下可以突出某一个问题来仔细研究，不受野外条件的干扰和限制，可以反复对比，得到比较理想的结果。因此，在解决工程地震方面的难题时被越来越广泛地应用，同时也成为工程多波地震勘探新理论的重要组成部分。

超声波地震模型模拟研究中一个重要的问题是，根据研究对象（原型）建造一个合理的模型。我们在试验中，根据相似性原则，用现场实际施工材料建造模型，以使实验结果更易于现场应用。根据隧道建设指挥部提供的有关设计图，隧道的整个底部基础可简化为混凝土路面层、钢板层、注浆层和抛石层 4 层。此外，为了推断注浆强度，还采用岩石综合物性测定方法进行了强度的模型实验。

根据管段的基础结构，以及检测的重点是注浆质量，建造了两组模型。每组模型为 3 层，即混凝土路面层、钢板层和注浆层。管段钢壁与注浆的耦合情况以及注浆质量、层厚等是要求检测的重点，故实验中为减少工作量，没有模拟抛石的第 4 层。两组模型尺度是一致的。其中第 2 组模型注浆层中预留了两个缺口，用来模拟注浆与钢板间出现的空隙以及江水或淤泥等情况。第 1 组为完整模型，以便与第 2 组进行比较。两组模型的尺度及缺陷参数见图 1。

模型混凝土层和注浆层的建造也是根据指挥部提供的试验报告配比资料精心建造的。管段的钢壁分别用钢板和玻璃两种介质交换模拟，这样多一种介质可进行对比。

实验仪器为湖南湘潭无线电厂生产的 SYC-2 型声波岩石参数测定仪。根据现场勘探条件，试验主要采用 3 种多波勘探方式，即地震剖面法、共反射点法和地震测井法。其中共反射点法的发、收间距为 10 cm。

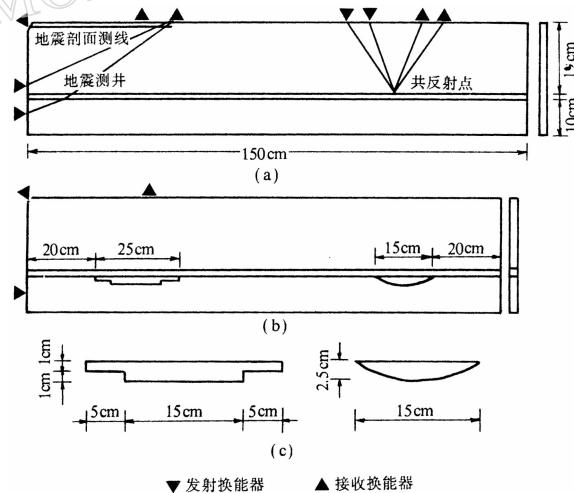


图 1 实验模型示意图(单位: cm)

(a) 模型及测线布设示意图；(b) 缺口

模型示意图；(c) 缺口尺寸

根据现场将使用的方法,模型实验的重点是观测研究反射波震相 P_{11} 和 S_{11} 以及转换波震相 PS 和首波震相 P_n 等运动学和动力学特征。作为典型震相实例分述如下。

1.1 反射波 P_{11}

实验分别在第 1 组模型和第 2 组模型上观测对比了反射波 P_{11} 的共反射点情况。测试时模型的砂浆层浸在水中,以模拟现场管段下可能存在江水的情况。从记录到的同相轴分析看,两组模型均观测到 P_{11} 反射震相,但第 1 组完整模型不如第 2 组有缺口模型的清晰突出。其原因是反映钢板界面与下面砂浆耦合好时,反射能量相对多地入射到砂浆层;耦合不好时,即相当于有缺口情况,其中模拟的江水或淤泥软弱层,其波阻抗均小于砂浆,因此透射能量相对较弱,反射能量相对较强,所以缺口处反射震相应该较强,形成较大的波阻抗差。从图 2 看,1~3 道和 21~24 道为无缺口反射记录,相当于第 1 组模型记录,4~20 道反射点在缺口处,反射振幅比 1~3 道和 21~24 道明显清晰突出。

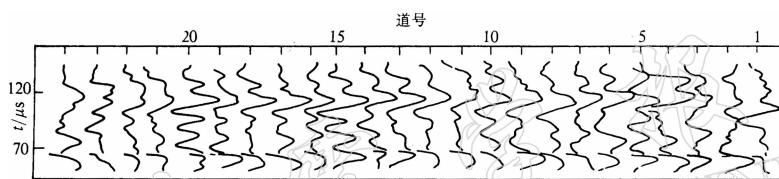


图 2 反射波 P_{11} 同相轴图(有缺口模型)

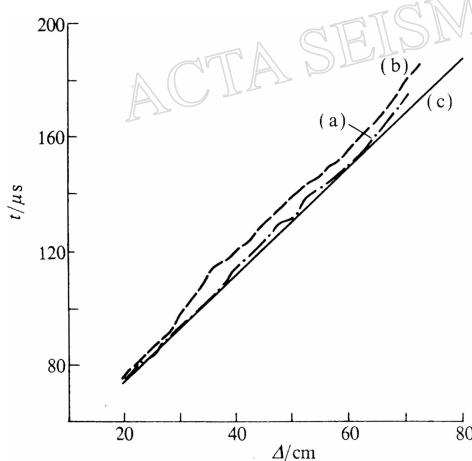


图 3 地震测井首波理论走时曲线和
实测走时曲线

(a) 第 1 组模型的实测曲线; (b) 第 2 组
模型的实测曲线; (c) 第 1 组模型的理论曲线

低速层,其波阻抗相对高时,高速夹层的速度也相对高;其波阻抗相对低时,高速夹层的波速也相对低。这一现象被称为波速的环境效应和尺度效应。图 3 给出了地震波测井法的首波理论和实测走时曲线。曲线(a)、(c)分别是第 1 组模型的测井实测和理论走时曲线,曲线(b)为第 2 组模型的测井实测走时曲线。

1.2 反射波 S_{11} 和转换波 PS 震相

观测到的 S_{11} 和 PS 震相类似于 P_{11} 震相。两组模型均记录到了 S_{11} 和 PS 震相。

1.3 首波震相 P_n

首波,工程地震上又称折射波,是反映高速层介质特性的一个重要震相(张智等,1982)。现场的管段底部钢板壁夹在混凝土路面层和砂浆层之间,正好是一个高速夹层模型。为研究该震相的特征,除了在地震剖面法外,还在地震波测井法观测中研究了 P_n 震相。观测表明,用地震波测井方法观测到的首波变化比地震剖面法观测到的更显著。

张智等(1982)以及郭铁栓和卢振业(1985)的研究结果表明,当高速层是一个薄层时,其首波波速与高速层上下界面低速层介质的波阻抗有关。当高速夹层界面上下的

从图3可以看出，首波的视速度实测值从炮检距 $\Delta = 34$ cm 开始波速偏低，这就是首波通过缺口时波速变低的结果（见图3 b 曲线）。同时，可以看到实测曲线(a)与理论曲线(c)吻合得较好。

2 实验结果在现场观测中的应用

2.1 反射波 P_{11}

反射波法是现场测试使用的主要方法之一。在模型实验时，第2组模型上记录到有缺口反射点的反射震相 P_{11} 比较突出。利用这一特征可对现场的反射震相进行比较判定。图4就是现场实测记录与模型实验记录的比较。图4a是实测D组反射波的一道记录，图4b是实测F组反射波的一道记录，图4c是模型实验无缺口反射波（上）和有缺口反射波（下）的记录。从图4b中可推测其强度是否为软弱层的反射波。

2.2 首波应用

在第1节管段中，现场进行了4条地震测井方法的首波测试。由于产生首波的高速夹层钢板仅有0.6 cm厚，首波的能量很小。在通过资料的仔细处理后，结合其它方法，认为n-n测线（见图5a）的首波走时偏长现象与其它方法是一致的。

以第1节管段的现场观测为例，给出的实测结果见图5。图5a是平面图，图5b为3条测线的剖面图。图中的阴影区为多波地震勘探方法确认的水下基础软弱区（淤泥、江水和砂浆混合物）。图中单个的英文大写字母是共反射点方法的测试区编号。在确定软弱区时，除前述震相外，在现场测试中还应用了直达纵波、横波、面波和转换波以及测强模型实验的对比结果。现场实测的主要结果有：

- (1) 管段水底基础的不均匀性普遍存在，分层不明显，等深分层不存在。
- (2) 注浆层普遍超过了设计的50 cm层厚，轴向剖面普遍呈倒“W”型。
- (3) 软弱区线性度与总测线长度比为7.9%。由震相特征和波速值推测软弱区为淤泥和注浆混合物。注浆层平均强度为2.36 MPa，达到设计要求。

实测主要结果经与现场施工记录以及水下注浆层边缘推测的情况对比，确认结果准确可靠。经有关专家评审和文献检索，确认国内外尚无这方面的检测事例。

地震模型实验在甬江隧道水底基础质量检测中的应用表明，地震模型试验技术作为

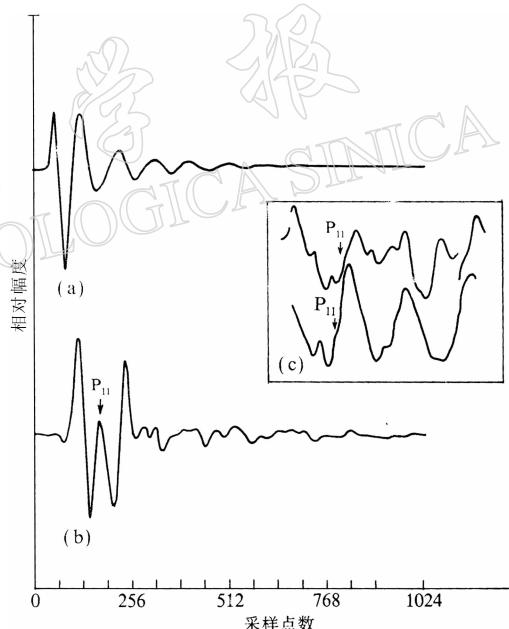


图4 实测记录与模型试验记录比较。图中横坐标5 μs为采样间隔，数字为采样点

- (a) 无软弱层D组中的一道记录；
- (b) 有软弱层F组中的一道反射记录；
- (c) 模拟实验反射记录（上为无缺口，下为有缺口）

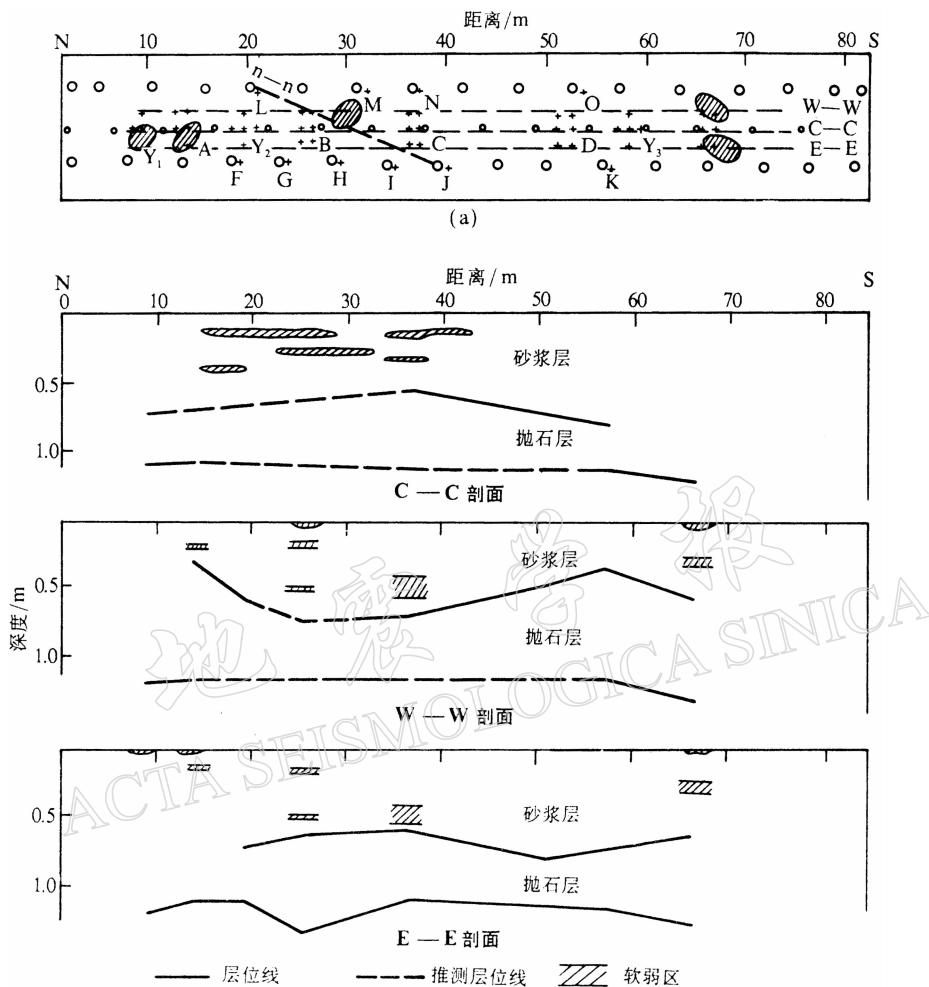


图 5 第 1 节管段现场测试结果

(a) 平面图. 大圆圈为注浆孔, 小圆圈为观测孔, “+”为反射法测点, “——”为测线; (b) 剖面图

工程多波地震勘探理论的重要组成部分, 在解决工程检测难题时的可行性和必要性; 同时也表明工程多波地震勘探理论的重要意义, 并为同行们提供了一个解决工程地震勘探难题的实例和有益的途径.

本项工作得到了北京大学地球物理系赵鸿儒教授的悉心指导, 在此深表谢意.

参 考 文 献

- 郭铁栓, 卢振业, 1985. 地震波速测量的尺度效应和环境效应. 中国地震, 1(4): 81~86
 张智, 郭铁栓, 赵鸿儒, 等, 1982. 厚度不同的高速层地震模型研究. 石油物探, 21(4): 74~84
 赵鸿儒, 唐文榜, 郭铁栓, 1986. 超声地震模型试验的技术及应用. 北京: 石油工业出版社. 372
 赵鸿儒, 郭铁栓, 1994. 工程地震勘探综述. 地球物理学进展, 9(3): 80~85