

高武平, 陈宇坤, 任峰, 闫成国, 王志胜, 杨菲, 2012. 天津滨海地区浅层剪切波速与基底构造关系研究. 震灾防御技术, 7(2): 130—136.

# 天津滨海地区浅层剪切波速与基底构造 关系研究<sup>1</sup>

高武平 陈宇坤 任峰 闫成国 王志胜 杨菲

(天津市地震局, 天津 300201)

**摘要** 剪切波速是反映土体动力学特性的重要物理量之一, 在土木工程抗震中有广泛的应用。本文收集整理天津滨海地区 500 余口横波测井资料, 在经纬向与垂直向以  $0.01^\circ \times 0.01^\circ \times 1\text{m}$  的三维网格进行线性插值, 获得了天津滨海地区近地表剪切波速空间分布的精细图像。根据资料分布与地质构造背景, 选取 2 个代表性波速剖面进行分析。结果表明, 滨海地区浅部剪切波速结构具有明显的分层特征与横向不均匀性, 进一步的分析认为, 不同地质构造单元的速度结构具有明显差异, 在大型区域或边界断裂两侧波速结构或受到扰动或受到明显影响, 充分显示了天津滨海地区基底构造与断裂活动对晚第四纪沉积发展和地层发育的控制以及对工程地震地质条件评价的影响。

**关键词:** 剪切波速 横波测井 天津滨海地区 波速结构 构造单元 断层 第四系

## 引言

剪切波速是反映土体动力学特性的重要物理量之一, 在土木抗震工程中的场地类别划分、液化判别、场地地震反应分析等方面有着十分广泛的应用。目前, 获取场地剪切波速的方法有多种, 波速测井是其中最直接、有效的方法之一, 但鉴于需要开拓钻孔, 经费昂贵, 波速测井数据的数量及覆盖都有限, 这也使对测井波速数据的应用多集中在了对剪切波速、深度、岩性等关系的研究(高飞等, 2005; 陈国兴等, 1998; 詹晨曦, 2004)。随着各个地区特别是经济新区的大规模发展以及大量基础工程的开展, 波速测井资料也在长期的积累中不断得到丰富。天津滨海地区就是波速测井资料较为丰富的地区之一, 特别是近年来重大工程场地地震安全性评价和大量地震钻孔的开展, 积累了数量众多且覆盖较好的测井资料。这些资料的获得为利用波速测井资料开展更广泛的研究创造了有利条件。

近几十年来, 研究波速结构及其地质构造关系得到了广泛开展并取得了许多有影响的成果。特别是深地震反射探测, 在研究中、深层地质结构和探索大震孕震环境与发震构造等方

**1 基金项目** 天津市科技创新专项资金项目(合同编号: 07FDZDSF02102)与天津市矿产资源补偿费地质项目(合同编号: 国土房任[2009]20号)联合资助

**[收稿日期]** 2011-12-14

**[作者简介]** 高武平, 男, 生于1981年。2003年毕业于中国矿业大学(北京)采矿专业; 2006年在中国地震局地球物理研究所获得地球信息与探测技术专业硕士学位; 工程师。主要从事地震安全性评价、软土地场频谱特性等研究。  
E-mail: gwpp123@126.com

面有其独到之处(王椿镛等, 1993); 浅层人工地震勘探在当前的隐伏断层探测中占有重要一席(何正勤等, 2007a; 2010); 面波勘探在浅部波速结构探测(何正勤等, 2007b)、场地勘察中也取得了很好的效果(王振东, 2006; 崔建文等, 1996)。但这些探测都是间接的, 获得直接有效的波速结构一直是众多学者努力的方向。本文以最直接、有效的横波测井资料为基础, 建立了天津滨海地区精度较高的浅层剪切波速三维结构, 对其典型特征的构造意义进行了分析, 以期获得对该地区波速结构与浅部构造关系的认识, 同时在横波测井资料的应用中也进行了一次有意义的尝试。

## 1 地质构造背景

### 1.1 地质构造概况

研究区位于渤海湾西岸, 地势平坦, 覆盖滨海新区—天津市市区一线及周边地区, 范围为: 北纬 38.6°—39.3°, 东经 117.0°—117.9°。在大地构造上, 主要跨越沧县隆起与黄骅拗陷两个三级构造单元, 在其西北包含部分冀中拗陷(图 1)。沧县隆起是一北北东向的狭长隆起, 夹于黄骅拗陷与冀中拗陷之间, 东西两边分别被沧东断裂和大城东断裂围割, 西北呈缓坡状向冀中拗陷过渡。该隆起东陡西缓, 平行轴间断裂发育, 并伴生有近于直交的张性断裂, 如海河断裂等。受这些断裂的围割, 发育了相间排列的凹陷和凸起, 如潘庄凸起、白塘口凹陷等。黄骅拗陷是一个与沧县隆起近平行的拗陷, 以沧东断裂与之相邻, 东部进入渤海湾, 呈逐渐向渤海拗陷过渡。拗陷轴向为北北东向, 向北转为北东向, 受北西西—北西向断裂交叉分割, 区内凹陷和凸起相间排列, 如板桥凹陷、塘沽鼻状凸起、北塘凹陷等。

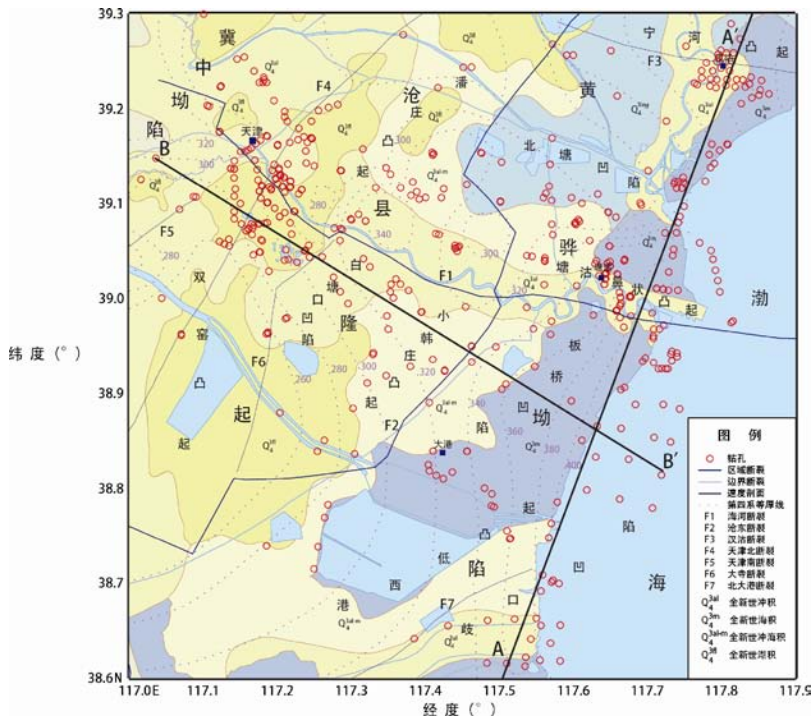


图 1 天津滨海地区大地构造与速度剖面位置图

Fig. 1 Tectonic background of Tianjin coastal area and location of velocity profiles

区内发育隐伏断裂多条,其中沧东断裂、海河断裂为两条区域性断裂,对研究区的整体构造演化具有一定的控制作用,天津断裂、汉沽断裂等构造单元边界断裂进一步交错围割,形成了研究区多凹、多凸,凹凸相间的构造格局。

有资料表明,新生代以来黄骅拗陷与沧县隆起这两个三级构造单元的沉积发育历史和构造活动状况都有明显差异(陈宇坤等,2004)。

## 1.2 第四纪沉积条件

第四纪以来,渤海湾地区相对沉降,接受了广泛的沉积。从早更新世至中更新世,古渤海曾多次出现海面变动,几次海水西侵到北京及京汉铁路以东的较大地区(黄福林等,1993)。晚更新世开始,发生了多次大规模的海侵与海退,形成了海、陆相地层相互交替和相互叠置的第四系。

研究区第四系覆盖广泛,以冲积、湖积和海积为主,是一起伏很小的冲积—海积平原。区内第四系层位相对稳定,其岩性特征和厚度变化都严格受基底构造和气候变化的控制(图1)。根据天津滨海平原的第四纪地层剖面,研究区内第四系岩性变化复杂,多薄层、互层,为松软海陆交互相沉积。主要地层底板埋深大致为:全新统在-20m左右;更新世上段为-70—-80m;更新世中段为-180—-210m;更新世下段为-400m(王强等,1986;天津市地质矿产局,1992)。地层特征如下:①全新统多为海相的灰绿色粘土和等亚粘、亚砂土。中段为灰绿-浅灰色淤泥质亚砂-亚粘土。主要为海相、河道相、三角洲相及泻湖相,含海相化石。底部含有泥炭层,为海侵前的滨海沼泽相沉积,见咸淡水生物化石。②上更新统以灰黄色、土黄、棕黄色亚砂-亚粘土为主,间有黄棕、灰绿色亚粘土和黑色泥炭。为河流相,海相,潮汐相,汉河-河流相,泻湖相、湖滨相夹海相等,含旋螺、沼螺、丽蚌等陆相生物化石。③中更新统土层颜色灰黄,砂性增强,以亚粘,亚砂为主,粘土少量。钙核和铁核极为发育,属湖相为主的类河流相沉积;下部以河口外坝、河口坝、汉河相和浅湖相,泻湖相沉积为主,含淡水生物化石组合为主,有海水侵入的海陆交互相。④下更新统为红棕色夹棕黄,灰黄,灰绿色亚粘土和粘土,局部夹亚砂中细砂。以湖相为主,夹有河流冲击相;与下伏第三系是不整合接触,其间有一含泥砂砾层。

区内第四系受基底构造影响十分明显,拗陷区与隆起区的第四纪地层在岩性、颜色、厚度、生物特征与沉积结构、类型、体系等方面都有较明显不同(王强等,1983,天津市地质矿产局,1992)。徐杰等(2004)通过对第四系厚度分布与盆地构造的关系研究表明,隆起的上第四系较薄,而拗陷内的第四系较厚。

## 2 波速测井资料

### 2.1 资料来源

波速测井资料主要来源于天津市地震灾害防御中心承担的地震安全性评价项目。本文共收集整理了2004—2011年期间在天津市及滨海地区开展的500多个地震安全性评价钻孔波速测井资料(图1)。这些波速测井钻孔均超过80m,绝大多数集中在100—120m范围,部分超过120m至150m,穿透了中晚第四纪地层。测试仪器为XG-I型悬挂式波速测井仪(图2)。采用了单孔检层法,以井液做耦合剂,探头无需贴壁,振源与探头距离固定为2m,2个探头间距1.0m。利用互相关分析法直接计算2个探头间的时间差,消除了仪器系统延时人工读取初至时间可能产生的误差,现场实时显示波速值,测试精度比较高,其基本原理如图2所示。

测试时，自下而上逐点进行，测点间距 1.0m。该方法简单有效，测试精度较高。对于天津滨海地区海陆交互层、薄层、夹层发育较多地层尤其实用，据张栋等(2005)与陈哲等(2010)的研究，单孔检层法对地层中的薄层、互层非常灵敏，能够有效识别岩土层中的薄夹层。

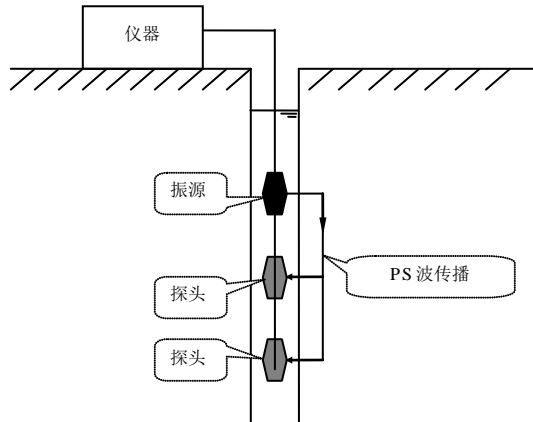


图2 XG-I型悬挂式波速测井仪工作示意图

Fig. 2 The schematic drawing of principle of XG-I type suspended logger

## 2.2 数据处理

由于数据量比较大，获取时间不一，为保证数据的精度，进行了三方面的工作：①对每一孔的原始记录波形进行了重新校核，获取了每一孔的 1m 间隔的剪切波速数据；②将每个孔的高程都统一到大连高程，由于高程对后续结果会产生很大影响，因此必须对高程进行统一，这里选用了在天津地区广泛使用的大沽高程系统；③对部分异常较大的数据进行了剔除，特别是早期获得的数据及其他单位测试获得的数据存在这样的问题。

然后将研究区范围经纬向按 0.01 度间隔，深度方向按 1m 间隔，划分为  $0.01^\circ \times 0.01^\circ \times 1\text{m}$  三维网格，进行线性插值，形成研究区 0—120m 深度范围的剪切波速三维图像。在求取波速剖面时，进行了相应的坐标变换。

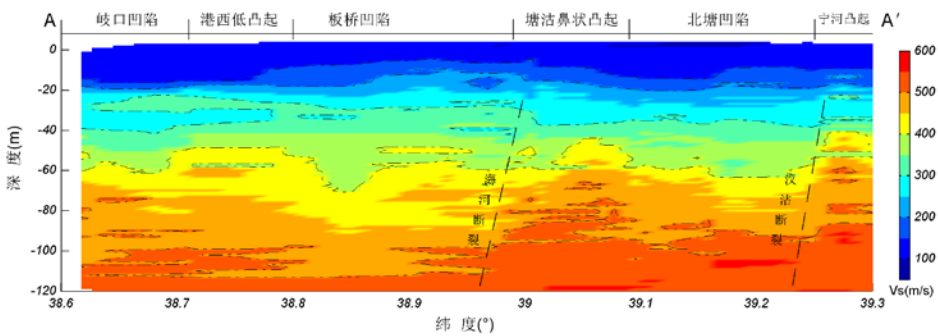
## 3 波速结构特征与基底构造关系

本文根据钻孔分布及大地构造单元位置情况，选取了 2 个典型的剪切波速剖面开展研究，剖面位置见图 1。AA'剖面为北北东向，跨越了黄骅拗陷内港西低凸起、板桥凹陷、塘沽鼻状凸起、北塘凹陷及宁河凸起等四级地质构造单元，与海河断裂、汉沽断裂等边界性断裂近垂直相交；BB'剖面为北西向，横跨黄骅拗陷与沧县隆起，并向西北延伸到冀中拗陷，穿过其中的多个凹陷与凸起，与沧东断裂、天津断裂等近垂直相交。图 3 显示了各剖面的剪切波速结构。

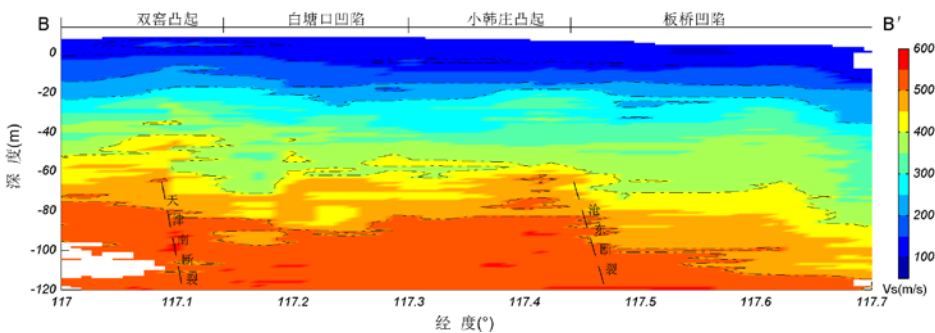
图 3 显示，天津滨海地区的剪切波速在浅部地层中变化比较平缓，具有明显的分层性。20m 深度以上地层剪切波速大部分在 250m/s 以下，局部在 150m/s 以下，结合天津滨海地区大部分地区覆盖层厚度超过 80m 的情况，可初步判定天津滨海地区的场地类别以 III 类为主，滨海地区局部场地类别达到 IV 类。在 50—60m 以下的中深部，剪切波速仍表现出较好的成层性，但明显受到下部构造单元和断裂构造的影响，在同一构造单元内具有一定的稳定性。由

剪切波速反应的假想基岩面埋深在隆起和坳陷区存在较大差异,受构造单元和基底断裂的影响很大。在沧东断裂以西的沧县隆起,假想基岩面埋深仅为 80m 左右,在沧县隆起内部的白塘口凹陷深度约 90m。然而在黄骅坳陷中覆盖层深度一般达到了 100m,坳陷中心地区达到了 110m 深度。

从图 3 中还可以明显地看出,总体上天津地区的剪切波速结构具有明显的横向不均匀性,不同构造单元的波速结构差异明显,这种差异随着埋深加深而更为显现。图 3 中 20m 以上的波速等值线变化不大,反映天津地区晚更新世晚期至全新世以来以稳定的滨海相沉积为主。20m 以下的等值线凹凸变化明显加大,且与地质构造单元划分基本一致。如北塘凹陷、白塘口凹陷、板桥凹陷、小韩庄凸起、塘沽鼻状凸起等在波速剖面图上都有明显的显示,这反映出基底构造单元对更新世晚期的沉积状态有较大影响。图 3 (b) 显示,剪切波速等值线具有一定的向渤海倾斜的趋势,这可能是新构造时期以来以渤海湾盆地为沉积中心的指向性显示。对渤海湾多次海侵与海退的研究显示,第四纪以来,以渤海为中心的广大地区一直在相对沉降,显示了滨海地区第四系在新构造运动时期的继承性特点。



(a) AA' 剖面速度结构



(b) BB' 剖面速度结构

图 3 天津滨海地区剪切速度结构

Fig. 3 Shear wave velocity profiles in Tianjin coastal area

剪切波速剖面图不仅对地质构造单元有清晰的显示,如显示出黄骅坳陷与沧县隆起这一坳-隆明显的波速结构差异,还显示了区域性断裂及边界断裂的作用和影响。

在图 3 (a) 中,海河断裂两侧的波速结构有很明显的扰动,扰动深度达到了 20m 左右,这与陈宇坤等 (2004) 对邓善沽钻孔地层对比剖面揭示的海河断裂东段最浅上断点埋深为

16.9m比较接近, 反映出海河断裂晚更新世至全新世仍有活动迹象。图中显示地层波速扰动宽度达到数千米, 这也与海河断裂在上部地层中表现为发散状的结构形态有关。汉沽断裂两侧的波速结构变化十分明显, 深度达到 40m, 与该断层钻孔地层对比结果显示的 47.7m的上断点深度比较接近<sup>1</sup>。沧东断裂与天津南断裂的影响深度相对较深, 在 60m左右, 反映了这两条断裂在晚第四纪以来活动性较弱的特征<sup>2</sup>。在图 3 中沧东断裂是黄骅拗陷与沧县隆起的明显分界, 汉沽断裂是北塘凹陷与宁河凸起的分界断裂, 汉沽断裂两侧, 波速等值线深度差异达 20 多米以上。

综上所述, 天津滨海地区的基底构造与断裂活动虽然在晚第四纪以来活动逐渐减弱, 但仍然具有继承性活动特点, 并影响和控制了其上的晚第四纪沉积环境变化和地层发育历史, 从而影响了中浅部晚第四纪地层的剪切波速特征, 使中浅部剪切波速结构和假想基岩面埋深出现了明显的横向不均性, 这对本地区的场地类别划分、工程地震地质条件评价与工程场地地震反应计算都具有重要影响。

## 4 结论

(1) 天津滨海地区的剪切波速在浅部地层中分布比较平缓, 具有明显的分层性。浅部地层剪切波速显示天津地区的场地类别主要以 III 类为主, 滨海地区局部场地类别达到 IV 类。

(2) 中深部地层波速明显受下部构造单元和断裂构造的影响, 在同一构造单元内表现出较好的成层性和稳定性, 但构造单元之间差异较大。由剪切波速反映的假想基岩面埋深受构造单元和基底断裂的影响很大。

(3) 区域性断裂及边界断裂对上部地层剪切波速结构也产生了明显的控制作用和影响, 海河断裂、沧东断裂、汉沽断裂等两侧的地层波速结构明显不同。地层波速影响深度的不同也反映了各断裂晚第四纪活动性的差异。

(4) 天津滨海地区的基底构造与断裂活动虽然在晚第四纪以来活动逐渐减弱, 但仍然影响和控制了其上的晚第四纪沉积环境变化和地层发育历史, 从而影响了中浅部晚第四纪地层的剪切波速特征, 使中浅部剪切波速结构和假想基岩面埋深出现了明显的横向不均性。

上述这些影响和控制作用, 对本地区的场地类别划分、工程地震地质条件评价与工程场地地震反应分析都具有重要影响。

## 参考文献

- 陈国兴, 徐建龙, 袁灿勤, 1998. 南京城区岩土体剪切波速与土层深度的关系. 南京建筑工程学院学报, (2): 32—37.
- 陈宇坤, 任峰, 张翠芬等, 2004. 天津海河隐伏断裂的晚第四纪活动特征研究. 地震地质, 26(1): 111—120.
- 陈哲, 章中良, 吴魁彬, 2010. 单孔与跨孔波速测试在工程中的应用. 地质学刊, 34(2): 192—195.
- 崔建文, 乔森, 1996. 瞬态面波勘探技术在工程地质中的应用. 岩土工程学报, 18(3): 35—40.
- 高飞, 孙小刚, 2005. 上海地区场地剪切波速的特征分析. 上海地质, (2): 27—36.
- 何正勤, 丁志峰, 贾辉等, 2007a. 用微动中的面波信息探测地壳浅部的速度结构. 地球物理学报, 50(2): 492—498.

1 天津市地震灾害防御中心, 2010. 滨海新区主要断裂及其活动性探测与研究报告.

2 天津市地震局, 2007. 天津市活断层探测与地震危险性评价技术报告.

- 何正勤, 陈宇坤, 叶太兰等, 2007b. 浅层地震勘探在沿海地区隐伏断层探测中的应用. 地震地质, **29** (2): 363—372.
- 何正勤, 潘华, 胡刚等, 2010. 核电厂址隐伏断裂探测中的地震勘探方法研究. 地球物理学报, **53** (2): 326—334.
- 黄福林, 胡连英, 徐学思等, 1993. 中国海新构造特征. 海洋地质与第四纪地质, **13** (增刊): 1—34.
- 詹晨曦, 2004. 福州盆地土层剪切波速特征. 福建建筑, (1): 61—64.
- 天津市地质矿产局, 1992. 天津市区域地质志. 北京: 地质出版社.
- 王椿镛, 王贵美, 林中洋等, 1993. 用深地震反射方法研究邢台地震区地壳细结构. 地球物理学报, **36** (4): 445—452.
- 王强, 李凤林, 1983. 渤海湾西岸第四纪海陆变迁. 海洋地质与第四纪地质, **3** (4): 83—90.
- 王振东, 2006. 面波勘探技术要点与最新进展. 物探与化探, **30** (1): 1—6.
- 徐杰, 冉勇康, 单新建等, 2004. 渤海海域第四系发育概况. 地震地质, **26** (1): 24—32.
- 张栋, 王锦棉, 徐雷良等, 2005. 冲积平原覆盖区地震波速测试方法及其应用效果. 海洋地质动态, **25** (11): 10—14.

## Study of Relation between Shallow Shear Wave Velocity and Basement Structure in Tianjin Coastal Area

Gao Wuping, Chen Yukun, Ren Feng, Yan Chengguo,  
Wang Zhisheng and Yang Fei

(Earthquake Administration of Tianjin Municipality, Tianjin 300201, China)

**Abstract** Shear wave velocity is one of the important dynamic characters of soil layer and has been applied widely in anti-seismic engineering. In this paper, we used drill logging data from 500 logs and made a linear interpolation based on  $0.01^{\circ} \times 0.01^{\circ} \times 1\text{m}$  grid to obtain a shallow 3-D shear wave velocity structure of Tianjin coastal area. Two typical velocity profiles are selected based on the geological background to explain the relationship to the basement structure. The results show that the shear wave velocity structure is clearly characterized by stratification and lateral inhomogeneity. Moreover, the shear wave structure is significantly different in different tectonic units. Therefore, it is reasonable to believe that the basement structure and faults activity here in Tianjin coastal area have a good control of sedimentation development and strata formation in the Quaternary period, which will play an important role in seismic engineering and geological condition evaluation.

**Key words:** Shear wave velocity; Transverse wave well logging; Tianjin Coastal area; Velocity structure; Tectonic element; Fault; Quaternary