

易文星, 李安, 雷生学, 等. 天津市平原地区土层剪切波速与埋深间的关系[J]. 华南地震, 2024, 44(1): 52-62. [YI Wenxing, LI An, LEI Shengxue, et al. Relationship between Shear Wave Velocity and Buried Depth in Tianjin Plain Area [J]. South China journal of seismology, 2024, 44(1): 52-62]

## 天津市平原地区土层剪切波速与埋深间的关系

易文星<sup>1</sup>, 李安<sup>1</sup>, 雷生学<sup>2</sup>, 郭长辉<sup>3</sup>, 原浩东<sup>4</sup>

(1. 中国地震局地质研究所 地震动力学国家重点实验室, 北京 100029; 2. 天津市地震局, 天津 300201;  
3. 中国地震局第一监测中心, 天津 300180; 4. 长安大学地质工程与测绘学院 西部矿产资源  
与地质工程教育部重点实验室, 西安 710054)

**摘要:** 天津市位于渤海湾, 土层以细颗粒物为主, 易发生地基失效和不均匀沉降的地震地质问题。利用天津市平原地区积累的钻孔剪切波速资料, 定性分析了剪切波速与土层深度的关系。分别对天津市平原区不同沉积区域的粘土、粉土、中细砂三种土类运用多种函数拟合模型进行统计回归。结果显示: 天津市土层剪切波速与埋深存在显著的正相关关系, 二次多项式函数拟合模型更适合用于该地区的剪切波速预测。天津市平原区的第四系地层沉积特征与剪切波速结果相关性明显, 显著影响预测模型的拟合优度。最后经过可靠性检验表明, 区分土类与不区分土类预测结果的平均相对误差均在10%以内, 在土类未知的情况下, 使用不区分土类的拟合关系式进行剪切波速的预测可以获得较为合理的可靠性结果。

**关键词:** 剪切波速; 土层埋深; 拟合公式; 统计回归

中图分类号: TU435

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2024)01-0052-11

DOI: 10.13512/j.hndz.2024.01.06

## Relationship between Shear Wave Velocity and Buried Depth in Tianjin Plain Area

YI Wenxing<sup>1</sup>, LI An<sup>1</sup>, LEI Shengxue<sup>2</sup>, GUO Changhui<sup>3</sup>, YUAN Haodong<sup>4</sup>

(1. State Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Institute of Geology, CEA, Beijing 100029, China;  
2. Tianjin Earthquake Agency, Tianjin 300201, China; 3. The First Monitoring and Application Center, CEA, Tianjin 300180, China; 4. Key Laboratory of Western China Mineral, Resources and Geological Engineering, College of Geological Engineering and Surveying of Chang'an University, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** Tianjin is located in the Bohai bay area, and its soil layer is dominated by fine particles, which is prone to seismic and geological problems of foundation failure and uneven settlement. The relationship between shear wave velocity and soil depth is qualitatively analyzed by using the data of borehole shear wave velocity accumulated in Tianjin plain area. The clay, silt and medium fine sand in different sedimentary regions of Tianjin plain area was statistically regressed by using different function fitting models. The regressive statistical analyses show that there is a significant positive correlation between the shear wave velocity and buried depth in Tianjin and the quadratic polynomial function fitting model is more suitable for the prediction of shear wave velocity in this

收稿日期: 2023-09-04

基金项目: 地震动力学国家重点实验室自主研究课题(LE2022A01); 国家重点研发计划课题(2018YFC1504202)联合资助。

作者简介: 易文星(2000-), 男, 硕士研究生, 主要从事活动构造与地震地质研究。

通信作者: 李安(1983-), 男, 博士, 研究员, 硕士生导师, 主要从事活动断层和地震地质研究。

E-mail: 18382302285@163.com

region. The correlation between the sedimentary characteristics of Quaternary strata and shear wave velocity in Tianjin plain area is obvious, which significantly affects the fitting accuracy of the prediction models. After the reliability test, the results show that the average relative errors of the prediction results which used the fitting model with different soil classification and the fitting model without classification is less than 10%. Furthermore, in the case of unknown soil types, using the fitting model without classification to predict shear wave velocity can obtain reasonable reliability results.

**Keywords:** Shear wave velocity; Soil depth; Fitting formula; Statistical regression

## 0 引言

在获取场地土质动力参数和评价场地土动力性能等方面上,岩土体剪切波速是极为重要的参考和分析依据。作为土动力学的重要参数之一,岩土体剪切波速被广泛应用在土木抗震工程中的方方面面,包括有场地土类别划分、住房用地防震规划、工程建筑地震安全性评价、场地砂土液化判别等工程项目,而岩土体剪切波速为这些工作提供了有力的数据支撑与评判标准<sup>[1]</sup>。因此,众多研究人员通过分析研究岩土体剪切波速与深度之间的关系,为城市、建筑等实际工程项目提供了重要参考,为这些工程项目的顺利完成做出了不小的贡献<sup>[2-4]</sup>。现如今场地剪切波速的获取方法多种多样,其中波速测井以其直接、有效、准确的优势成为使用最多的方法,但由于考虑到实际需要,如波速测井需要对测量地区进行打孔钻探工作,经费昂贵、资金消耗大,而且波速测井数据的数量及覆盖都十分有限,因此导致在对测井波速数据的应用方面上,研究人员们多集中在了对剪切波速、土地埋深、岩性等相互关系的探讨<sup>[5]</sup>。因此,如果能够根据已有的钻孔资料并结合该地土层类别,给出剪切波速与土层埋深的经验关系,不仅可以得到该地区土层剪切波速的最佳预测模型和满足工程抗震设计和场地类型划分的剪切波速结果,还能节约成本、加快工程进度。所以,对于研究某一地区剪切波速与埋深之间关系的问题,到现今为止仍是具有实际需要和重大工程意义的研究课题。

国内外众多学者对该问题展开了一系列有意义的研究工作。如20世纪80年代,Lew等<sup>[6]</sup>在仔细分析了土体的性质、物理状态和饱和度之后,提出了可以直观显示场地土剪切波速 $V_s$ 与土层深度 $H$ 之间关系的幂函数模型。国内也相继开展了大量的研究工作,曾勇<sup>[7]</sup>分析了国内多地区的场地土层

剪切波速资料、任瑞国等<sup>[8]</sup>统计分析了山西临汾市的土层剪切波速资料、乔峰等<sup>[9]</sup>基于河北廊坊地区的常规土类实测钻孔剪切波速资料,建立 $V_s$ 经验公式,分析结果认为剪切波速与埋深之间存在相关性、土层深度是场地剪切波速重要的控制因素。何仲太等<sup>[11]</sup>基于衡水市城区范围内的钻孔资料,主要采用线性函数模型,给出了衡水市城区常规土类剪切波速与土地埋深之间的统计公式;蒋其峰等<sup>[10]</sup>通过收集鲁西平原地区工程场地钻孔的剪切波速资料,采用幂函数模型,得出了该地区常见土类的剪切波速与埋深间关系的经验公式;刘红帅等<sup>[11]</sup>利用全国各地地震安全性评价工作积累的资料,在归纳整理了其中有关剪切波速部分的实测数据之后,使用数学函数公式中的最小二乘法分别以线性函数模型、指数函数模型和多项式函数模型,在两种情况下(区分场地类别和不区分场地类别)分别建立了全国范围内常规土类的剪切波速与土层埋深之间关系的统计公式。

天津地区是波速测井资料比较丰富的地区之一,由于许多重大工程场地地震安全性评价工作的开展和大量地震钻孔的开拓,天津地区拥有了数量众多且覆盖较好的测井资料<sup>[5]</sup>。这些积累的资料为通过利用波速测井数据开展更为广泛的研究创造了有利条件,如王琦等<sup>[12]</sup>在整理分析了天津地区地震安全性评价工作积累的有关实测剪切波速的数据资料基础上,通过使用幂函数模型建立了 $V_s$ 经验公式,定性分析了常见土类剪切波速与土地埋深的相关性;高武平等<sup>[5]</sup>利用天津滨海地区波速测井数据资料,研究分析了天津市滨海地区浅层剪切波速与基底构造的关系。本文运用天津市市区实测剪切波速钻孔数据资料,经过统计分析,对天津市第四系岩性和剪切波速及土层埋深关系进行探讨,旨在找到适用于天津大范围地区内的剪切波速预测模型及经验关系式,为天津地区工程抗震设计等提供参考的基础上,达到节约成本、方便快捷的目的。

# 1 天津市第四纪地层及沉积体系

## 1.1 第四纪地层

天津地区地势北高南低,北部为山区,面积占比极少,约为6%,山区海拔为100~500 m,最高峰海拔为1078.5 m;而南部为平原区,平原区面积占比约94%<sup>[13]</sup>,平原区内地势平坦,地面高程为3.50 m左右,地形自然坡度极低<sup>[14]</sup>。天津市地区第四系分区问题,采用较早提出的以蓟县山前断裂和宝坻断裂为分界线的观点,将天津市自北向南划分成为三个区,分别是蓟县山区、北部平原区和南部平原区。关于三个区域的具体沉积情况,其中,蓟县山区面积积极小(约6%),第四系沉积物主要为风积黄土、砂砾石和少量黏土,第四系沉积厚度极低,最大厚度仅为75 m,尚未提出第四纪标准地层剖面;北部平原区为山前倾斜平原,因靠近山前而多砾石堆积,面积小(约10%)且岩相变化快,最大沉积厚度仅为221 m,尚未专门性开展第四系研究,沉积剖面仅进行粗略划分;然而,南部平原区面积占比极大(约84%),第四系沉积厚度也较大,最大厚度超过400 m,沉积情况较为复杂,存在有河流冲积、湖泊堆积、海洋沉积的多种沉积相,但其也因层位稳定且分布范围大而受到广泛研究,因此其也可作为天津地区第四纪标准沉积地层剖面<sup>[13]</sup>。现以天津地区第四系南部平原区为主要地层划分研究区,再综合天津地区多个钻孔资料 and 前人填图研究资料,最后总结归纳出天津地区第四纪沉积地层剖面如下(地层柱状图见图1):

下更新统( $Q_p^1$ ):底板埋深400 m左右,下段(108.90 m)岩性多为褐灰色粉土、黄灰色细砂、浅灰色粘土、浅灰色亚粘土与棕褐色粘土,其中粉土、细砂、粘土与亚粘土交互出现,沉积相以湖相为主,夹有河流冲击相,与下伏第三系地层为不整合接触;上段(95.79 m)为褐灰色粉土、灰褐色亚粘土、褐黄色粘土互层,含陆相生物化石。

中更新统( $Q_p^2$ ):底板埋深196.5 m,下段(68.00 m)多为灰黄色、灰色粉土与深色粘土互层,以河流相沉积为主,含淡水生物化石组合;中段(34.50 m)为黄灰色粉土、细砂与灰色粘土互层,以陆相沉积为主,可见陆相介形虫;上段(19.50 m)多为黄灰色细砂,以湖相沉积为主。

上更新统( $Q_p^3$ ):底板埋深69.9 m,下段(7.15

m)为灰色细砂、粉土夹灰黑色薄层亚粘土,以河流相沉积为主;中段(20.63 m)岩性由老到新为淡绿色粘土过渡到灰色、灰黄色亚粘土,以浅水湖相沉积为主;上段(23.52 m)岩性由老到新为褐黄色细砂过渡到灰黄色粘土与亚粘土的互层,以河流相、海相沉积为主。

全新统( $Q_h$ ):底板埋深18.6 m,下段(2.60 m)为浅灰、灰黄色亚粘土,见陆相介形虫化石;中段(10.4 m)岩性由老到新为黑色炭质粘土过渡到灰色、黄灰色亚粘土,为海侵前的滨海沼泽相沉积;上段(5.60 m)为黄褐色亚粘土,含少量有孔虫等生物化石,主要沉积环境为海相。

## 1.2 第四纪沉积环境

天津地区第四系沉积体系发育阶段由老到新可以分成四个体系,分别为:代表砾石网状河流下段的低弯砂质河体系;以河曲弯度大的高弯砂质河与多出现在河道间的洼地和丘陵的河间越岸沉积体系;以河床相—心滩相—漫滩相依次过渡的低弯砂质河体系重复;高弯砂质河、河间越岸、沿海岸展布受海侵影响的三角洲平原体系,这四个体系几乎涵盖了整个天津地区第四纪沉积环境的变化过程,并且该地区沉积体系不是简单的重复过程,而是发展中的重复<sup>[13]</sup>。天津地区第四系覆盖广泛,第四纪以来以陆相沉积为主,是一起伏很小的冲积—海积平原,地貌和沉积环境共同影响了具体成因类型。总的来说,天津市市区所在的平原中心范围内是较广的河流冲积、湖泊堆积、海洋沉积的交互沉积区;而靠近海岸的沿海地带由于岩性特征和厚度变化受到沉积基底结构和气候环境变化的影响较大,主要为河流与潮汐交互频繁的沉积区<sup>[14]</sup>。

# 2 剪切波速的计算与资料统计分析

## 2.1 土层剪切波速计算理论

土层剪切波速是指在土壤中横向波(S波)的传播速度,该横向波是地震波垂直于波的传播方向振动的波动形式,通常用 $V_s$ 表示。土层剪切波速常常受到土体种类、土层埋深、土体性质(密度、粒径、组构形态)等因素的影响。在计算土层剪切波速时,通常使用如下公式<sup>[15]</sup>:

$$V_s = \sqrt{G/\rho} \quad (1)$$

式(1)中, $V_s$ 是土层剪切波速,单位常用m/s; $G$ 表



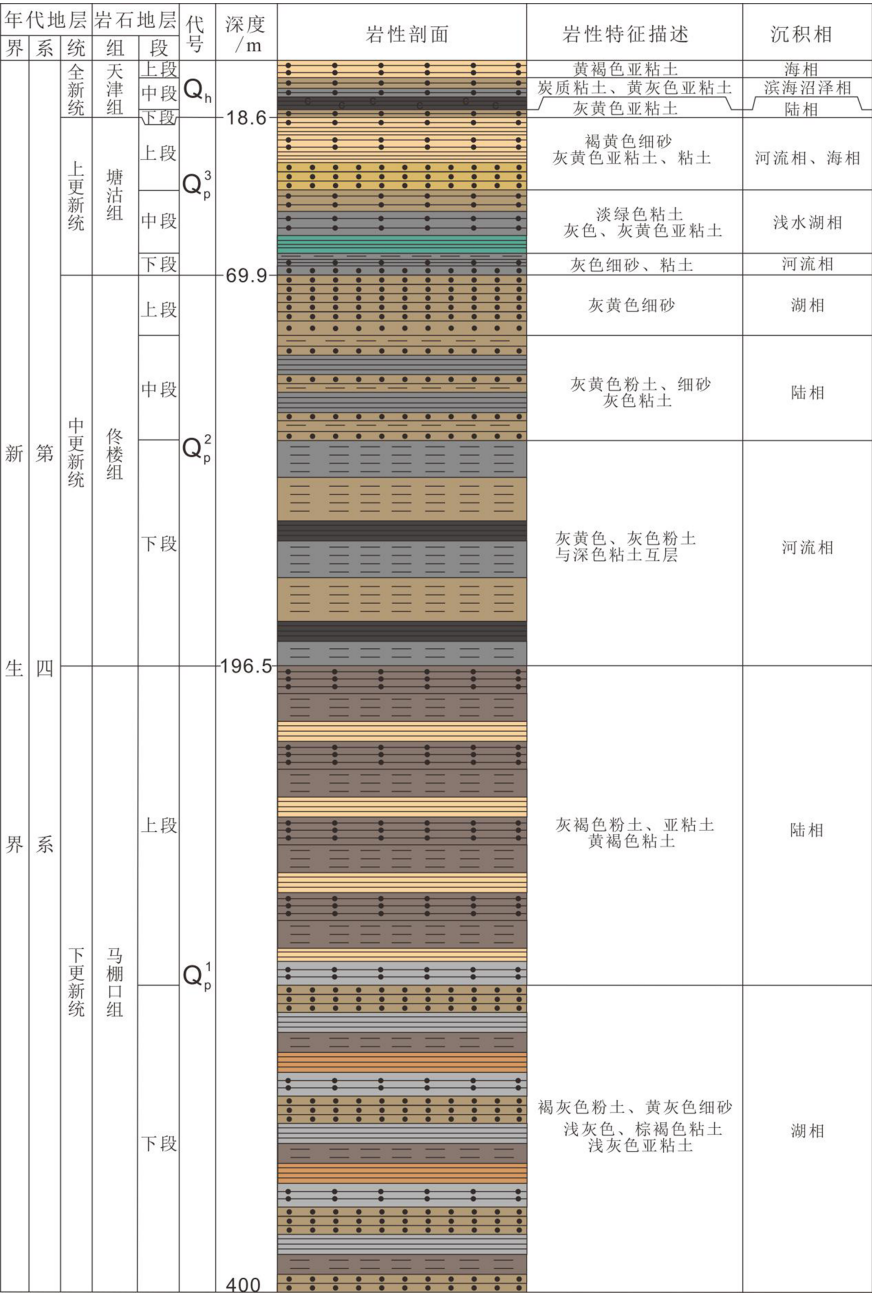


图1 天津地区第四纪地层柱状图

Fig.1 Column chart of Quaternary stratum in Tianjin area

示土层的剪切模量，指土体受到剪切作用时应变与应力之间的比值，常用单位为Pa(N/m²)； $\rho$ 为土体密度，常用单位kg/m³。剪切模量G可以通过钻孔勘探所用仪器得出的横波数据进行计算，而土壤密度则通过地下钻探获取的岩心样品进行实验测量得出。

2.2 资料统计

本次工作所选用资料来源于天津平原地区钻孔实测剪切波速资料。图2为本次工作选用样本钻孔分布图。根据天津市第四纪沉积环境分区，本

文中钻孔均分布于中心平原区和滨海平原区两个区域，以此来保证统计结果的适用性。本次参与统计的钻孔数量为261个，其中中心平原区105个钻孔，滨海平原区156个钻孔，共计钻孔数据5964组。为保证测试结果的可靠性，在资料数据处理上进行了复读、复检，同时对个别差异性太大的钻孔数据进行了删减，以在最大程度上减小随机因素对结果的影响。因此，删除了中细砂中3组离散性较大的数据，共统计分析5961组数据。钻孔所钻深度最深为151 m，所测数据包括有粘土(3560组)、粉土(2068组)、中细砂(333组)在不同深度的实测剪切波速。



### 2.3 分析方法

当需要做剪切波速与深度变化规律统计回归工作时,主要的经验关系为以下三种:①线性函数拟合模型(模型一): $V_s=a+bH$ ;②二次多项式函数拟合模型(模型二): $V_s=a+bH+cH^2$ ;③幂函数拟合模型(模型三): $V_s=cH^d$ 。这三种经验关系式中的 $V_s$ 是土体剪切波速(单位: m/s); $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ 是拟合参数(方程的回归参数); $H$ 是土体埋深(单位:

m)。本文主要采用以上三种数学模型对天津地区的剪切波速数据进行统计回归分析,可以根据所需统计数据获得三种拟合模型的具体拟合参数( $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ ),而为了评价所得回归方程关于这些数据的回归效果的优劣,通常以所得最终经验关系式的拟合优度 $R^2$ 来检验此拟合模型对观测数据的拟合程度。拟合优度( $R^2$ )的取值范围为0~1,最大值为1,而当 $R^2$ 越接近1时,说明拟合程度越好,该拟合模型也越适合该地区进行数值模拟工作。

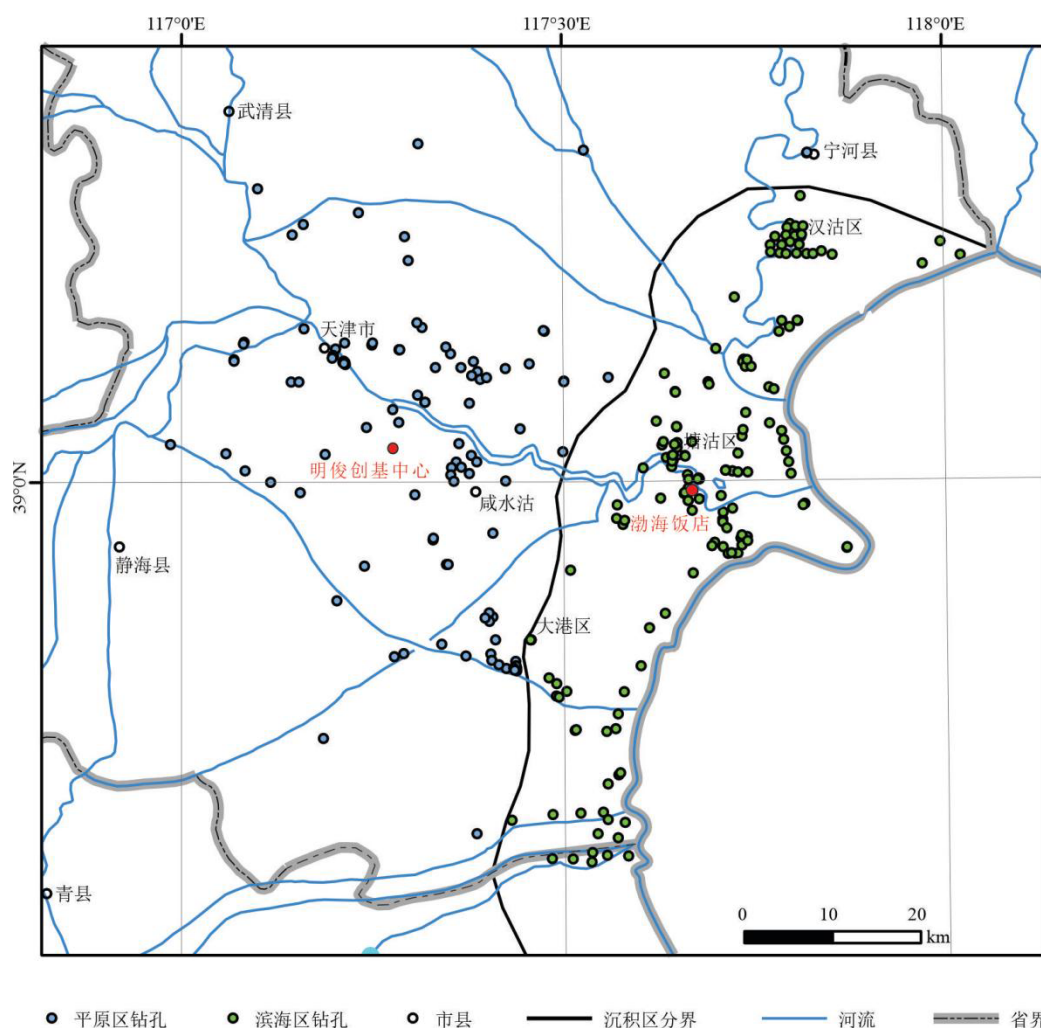


图2 天津市钻孔位置分布图

Fig.2 Spatial distribution of boreholes in the Tianjin area

## 3 土层剪切波速与埋深间关系分析

利用上述关于剪切波速的统计分析方法,以分布在天津市不同区域的261个钻孔,共5961组剪切波速实测数据进行统计回归,得到了参与此次统计的天津市全部钻孔数据、中心平原区钻孔数据、滨海平原区钻孔数据的拟合关系式,以及得到了天

津地区三种土类(粘土、粉土、中细砂)剪切波速与深度的统计关系。此次统计分析的剪切波速拟合结果如表1所示,剪切波速随深度拟合曲线如图3所示。

从图3可以直观清晰地看出,无论是区域位置不同,还是土体种类不同,天津地区的钻孔剪切波速都与埋深之间具有明显的相关性,而且是正相关。从对实测数据的三种拟合模型的曲线来看,天

津地区土体埋深越深, 剪切波速越大。无论从区域位置还是土体种类来看, 剪切波速随埋深变深而增大的速度趋势逐渐减小(即埋深越深, 剪切波速增速越慢), 可以看出剪切波速随埋深而增加不是一个简单的增速不变的一次函数模型, 而更符合增速随埋深逐渐变小的二次函数模型或幂函数模型(即土层剪切波速与埋深不是简单的线性相关, 而是非线性相关)。从图3中可以看出, 二次多项式拟合曲线在埋深大于100 m之后的剪切波速增长逐渐趋于平缓, 与实测数据相比的误差较之于幂函数拟合曲线更小一些。因此二次函数拟合曲线相较于幂函数拟合曲线, 在埋深大于100 m之后, 更符合剪切波速的增长趋势。

考虑区域划分对场地土剪切波速与埋深间关系的影响, 全部平原区、中心平原区和滨海平原区不分土类的场地土剪切波速与埋深间关系的拟合结果差异很小,  $R^2$ 均在0.9左右(表1)。根据第四纪地层厚度和沉积环境, 天津平原区100 m左右

埋深处为中更新统中上段地层。埋深70 m以上为全新统一晚更新统地层。这一时期, 中心平原区为河流冲积、湖泊堆积、海洋沉积的交互沉积区; 而靠近海岸的滨海平原区也主要为滨海相沉积与河流冲积相的交互沉积为主。沉积连续, 且沉积差异小的特点使不同沉积分区间的拟合关系也相应的表现出差异小的特征。

将天津市的土类划分为粘土、粉土、中细砂共3类, 用以探讨分析不同土类对场地土剪切波速与埋深之间的关系。其中各类土体的剪切波速与土层深度关系见图3, 参数见表1。根据拟合结果发现: 三种土类的剪切波速与埋深关系中, 线性模型的拟合优度均明显低于二次多项式和幂函数模型。其中二次多项式模型在三种土类中都为推荐模型; 不同土类的拟合优度差异较大, 表现出土类粒径越小, 拟合优度越高的特点; 在相同的埋藏深度下, 对于不同类型的土类, 越是较大粒径的土类, 其剪切波速越大。

表1 土层剪切波速与深度关系拟合结果  
Table 1 Fitting results of the relationship between the shear wave velocity and soil depth

沉积区及土类	模型类别	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	$R^2$	推荐模型
全部钻孔	模型一( $a+bH$ )	132.92	4.0034			0.8935	
	模型二( $a+bH+cH^2$ )	72.713	7.1126	-0.0275		0.9313	模型二
	模型三( $cH^d$ )			43.764	0.5316	0.9154	
中心平原区	模型一( $a+bH$ )	133.62	4.0279			0.9	
	模型二( $a+bH+cH^2$ )	82.496	6.7505	-0.0246		0.929	模型二
	模型三( $cH^d$ )			47.959	0.5097	0.9148	
滨海平原区	模型一( $a+bH$ )	132.21	3.989			0.8891	
	模型二( $a+bH+cH^2$ )	65.064	7.3827	-0.0295		0.9337	模型二
	模型三( $cH^d$ )			40.54	0.5499	0.9186	
粘土	模型一( $a+bH$ )	122.03	4.0335			0.9191	
	模型二( $a+bH+cH^2$ )	74.744	6.6436	-0.0236		0.9476	模型二
	模型三( $cH^d$ )			45.055	0.517	0.915	
粉土	模型一( $a+bH$ )	150.97	3.938			0.8668	
	模型二( $a+bH+cH^2$ )	74.048	7.6152	-0.0319		0.9152	模型二*
	模型三( $cH^d$ )			41.917	0.5517	0.9203	模型三
中细砂	模型一( $a+bH$ )	250.61	2.6091			0.7222	
	模型二( $a+bH+cH^2$ )	155.55	5.4919	-0.0195		0.753	模型二
	模型三( $cH^d$ )			73.658	0.4198	0.7518	模型三*

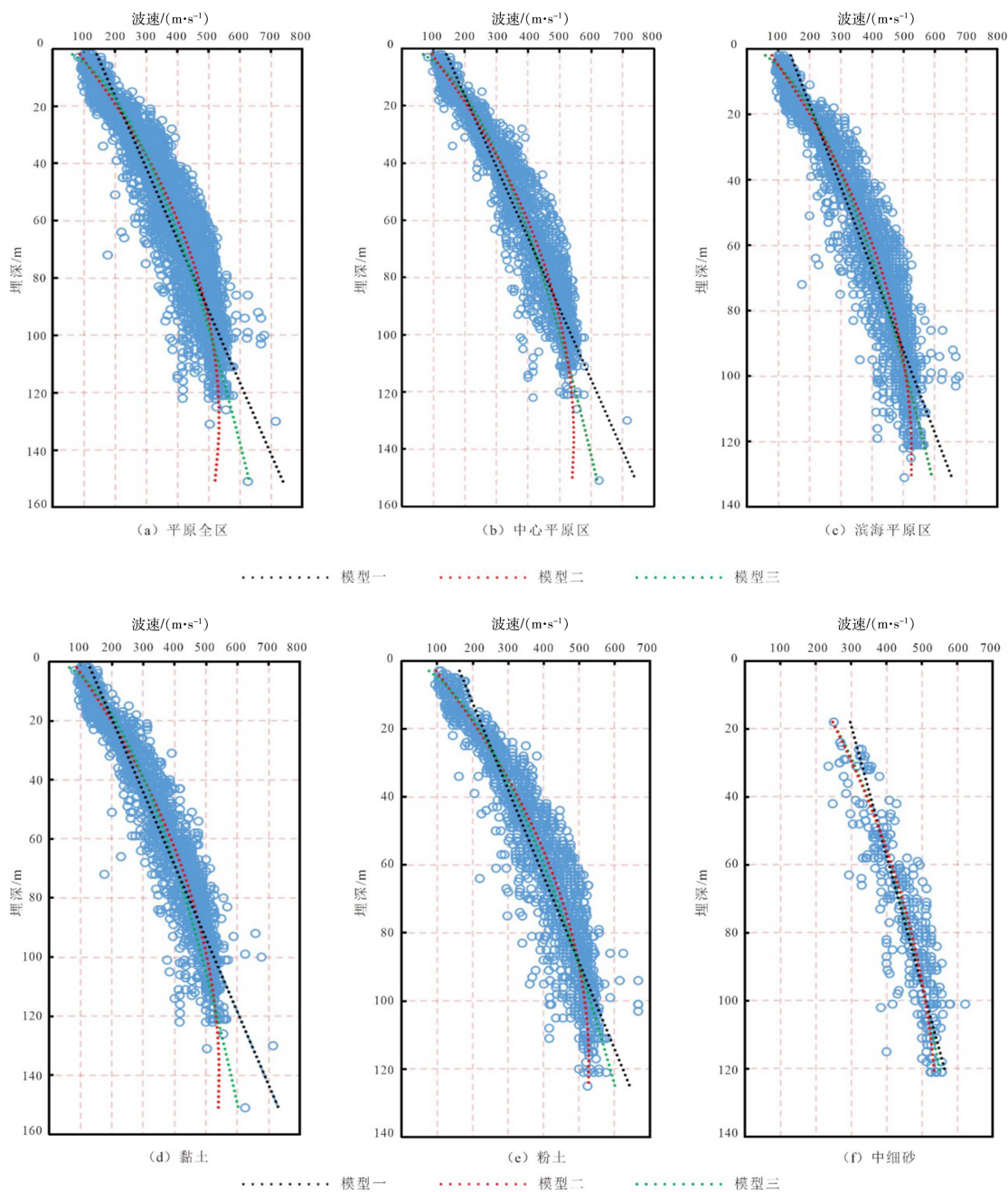
注: \*与最优 $R^2$ 差异小于0.01的推荐模型

根据不同沉积区的统计分析中, 全区、中心平原区和滨海平原区不分土类的推荐模型均为模

型二(即二次多项式模型), 拟合优度 $R^2$ 均达到0.93左右。而不同土类的拟合结果差异较大, 其中

粘土数据拟合优度最高的模型二的  $R^2$  达 0.9476。粉土数据的三种模型拟合优度  $R^2$  在 0.86~0.92，其中模型二和模型三拟合优度较高且相近；中细砂

数据的三种模型拟合优度  $R^2$  在 0.72~0.75，其中模型二和模型三拟合优度也较高且相近。



(黑色虚线表示模型一;红色虚线表示模型二;绿色虚线表示模型三)  
a:平原全区;b:中心平原区;c:滨海平原区;d:粘土;e:粉土;f:中细砂

图3 天津市不同土层剪切波速随深度变化拟合曲线

Fig.3 Fitting curve of shear wave velocity with depth in different soil layers in Tianjin

综合不同沉积区和不同土类的统计,天津平原地区无论何种分类中,二次多项式模型的拟合优度都较为良好,可作为天津市平原区土体剪切波速与埋深间的关系推荐模型。具体经验关系式如下:天津市全区:  $V_s = 72.713 + 7.1126H - 0.0275H^2$ ;

中心平原区:  $V_s = 82.496 + 6.7505H - 0.0246H^2$ ; 滨海平原区:  $V_s = 65.064 + 7.3827H - 0.0295H^2$ ; 粘土:  $V_s = 74.744 + 6.6436H - 0.0236H^2$ ; 粉土:  $V_s = 74.048 + 7.6152H - 0.0319H^2$ ; 中细砂:  $V_s = 155.55 + 5.4919H - 0.0195H^2$ 。



4 推荐模型检验

选取未计入统计的天津市平原区明俊创基中心的110 m 钻孔资料和天津市滨海区渤海饭店的100 m 钻孔资料(验证钻孔位置见图2)来进一步验证本文统计回归得出的经验关系式的可靠性和适用性。将使用本文推荐的区分土类和不分土类的模型二所得预测波速与实地钻孔探测剪切波速进行对比分析,分析过程中的相对误差为预测值与实测值之间的误差。两个钻孔每1 m埋深选取一组数据,因为两个钻孔前两米土类为人工填土,故不将其纳入检验分析。因此,共选取明俊创基中心钻孔3~110 m埋深108组剪切波速实测数据,渤海饭店3~100 m埋

深98组剪切波速实测数据。虽然所有数据全部预测得出结果,但因篇幅有限,以4 m埋深为梯度,共选择明俊创基中心27组数据与渤海饭店25组数据列出,详细数据见表2~3。预测值均使用推荐模型二(二次多项式模型)获得,预测经验关系式分别为:粘土: $V_s=74.744+6.6436H-0.0236H^2$ ;粉土: $V_s=74.048+7.6152H-0.0319H^2$ ;中细砂: $V_s=155.55+5.4919H-0.0195H^2$ ;不区分土类预测经验关系式为: $V_s=72.713+7.1126H-0.0275H^2$ 。

通过验证结果发现,将利用本文的回归关系式推算出来的预测剪切波速值与实测剪切波速值进行对比,发现两者的误差较小,而且总体相对误差平均值控制在10%以内(表2~3)。但从两个表中列出数据可以看出,尚存在一些误差较大的结果。

表2 中心平原区检验钻孔的剪切波速与土层深度关系的预测结果与实测结果比较  
Table 2 Comparison between the predicted results and the measured results of the relationship between the shear wave velocity of the borehole and the soil depth in the central plain area

埋深/m	岩性	实测波速 /(m·s <sup>-1</sup> )	分岩土类型预测 值/(m·s <sup>-1</sup> )	相对误差/(%)*	不分岩土类型预 测值/(m·s <sup>-1</sup> )	相对误差/(%)*
4	粉质粘土	127	100.94	-20.52%	100.72	-20.69%
8	粉土	145	132.93	-8.33%	127.85	-11.82%
12	粉质粘土	161	151.07	-6.17%	154.10	-4.28%
16	粉质粘土	187	175.00	-6.42%	179.47	-4.02%
20	粉土	204	213.59	4.70%	203.97	-0.02%
24	粉质粘土	250	220.60	-11.76%	227.58	-8.97%
28	粉土	260	262.26	0.87%	250.31	-3.73%
32	细砂	267	311.32	16.60%	272.16	-1.93%
36	粉质粘土	313	283.33	-9.48%	293.13	-6.35%
40	粉土	339	327.62	-3.36%	313.22	-7.61%
44	粉质粘土	357	321.37	-9.98%	332.43	-6.88%
48	粉土	345	366.08	6.11%	350.76	1.67%
52	粉土	351	383.78	9.34%	368.21	4.90%
56	粉土	339	400.46	18.13%	384.78	13.50%
60	粉土	351	416.12	18.55%	400.47	14.09%
64	粉土	408	430.76	5.58%	415.28	1.78%
68	粉质粘土	435	417.38	-4.05%	429.21	-1.33%
72	粉质粘土	417	430.74	3.30%	442.26	6.06%
76	粉质粘土	435	443.34	1.92%	454.43	4.47%
80	粉土	465	479.10	3.03%	465.72	0.16%
84	粉质粘土	439	466.28	6.22%	476.13	8.46%
88	粉质粘土	476	476.62	0.13%	485.66	2.03%
92	粉质粘土	465	486.20	4.56%	494.31	6.30%

(转下表)

(接表2)

埋深/m	岩性	实测波速 /( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	分岩土类型预测 值/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	相对误差/(%) <sup>*</sup>	不分岩土类型预 测值/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	相对误差/(%) <sup>*</sup>
96	粉质粘土	455	495.03	8.80%	502.08	10.35%
100	粉质粘土	513	503.10	-1.93%	508.97	-0.78%
104	粉质粘土	526	510.42	-2.96%	514.98	-2.09%
108	粉质粘土	541	516.98	-4.44%	520.11	-3.86%
平均值		354.5	360.1	17.301%	358.1	15.861%

注: \*预测值小于实测值为负, 相对误差的平均值为相对误差的绝对值平均; 验证钻孔位置为明俊创基中心。

表3 滨海平原区检验钻孔的剪切波速与土层深度关系的预测结果与实测结果比较

Table 3 Comparison between the predicted results and the measured results of the relationship between the shear wave velocity of the borehole and the soil depth in the coastal plain area

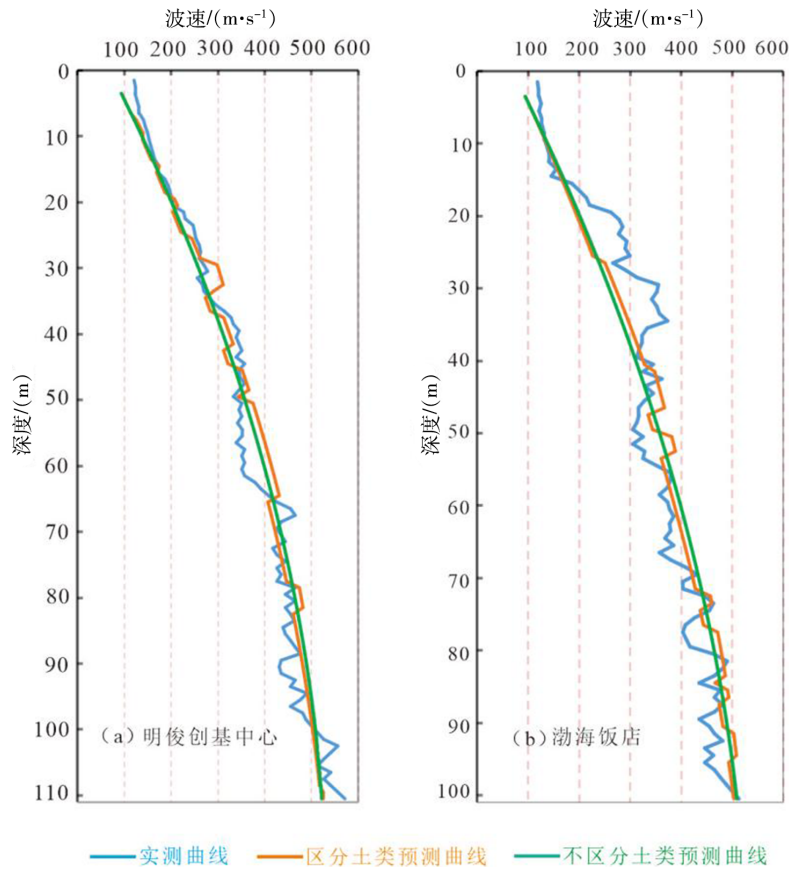
埋深/m	岩性	实测波速 /( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	分岩土类型预测 值/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	相对误差/% <sup>*</sup>	不分岩土类型预 测值/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	相对误差/% <sup>*</sup>
4	淤泥质粉质粘土	125	100.94	-19.25%	100.72	-19.42%
8	淤泥质粉质粘土	131	126.38	-3.52%	127.85	-2.40%
12	淤泥质粉质粘土	140	151.07	7.91%	154.1	10.07%
16	淤泥质粉质粘土	200	175.00	-12.50%	179.47	-10.26%
20	淤泥质粉质粘土	278	198.18	-28.71%	203.97	-26.63%
24	淤泥质粉质粘土	290	220.60	-23.93%	227.58	-21.53%
28	粉土	313	262.26	-16.21%	250.31	-20.03%
32	粉土	352	285.07	-19.01%	272.16	-22.68%
36	粉土	323	306.85	-5.00%	293.13	-9.25%
40	粉土	345	327.62	-5.04%	313.22	-9.21%
44	细砂	345	359.44	4.19%	332.43	-3.64%
48	粉质粘土	313	339.26	8.39%	350.76	12.06%
52	细砂	328	388.40	18.41%	368.21	12.26%
56	粉质粘土	379	372.78	-1.64%	384.78	1.52%
60	粉质粘土	377	388.40	3.02%	400.47	6.23%
64	粉质粘土	368	403.27	9.58%	415.28	12.85%
68	粉质粘土	408	417.38	2.30%	429.21	5.20%
72	粉土	446	456.97	2.46%	442.26	-0.84%
76	粉质粘土	408	443.34	8.66%	454.43	11.38%
80	粉土	463	479.10	3.48%	465.72	0.59%
84	粉土	435	466.28	7.19%	476.13	9.46%
88	粉质粘土	465	476.62	2.50%	485.66	4.44%
92	粉土	481	504.64	4.92%	494.31	2.77%
96	粉质粘土	465	495.03	6.46%	502.08	7.97%
100	粉质粘土	513	503.10	-1.93%	508.97	-0.78%
平均值		347.6	345.9	19.051%	345.3	19.741%

注: \*预测值小于实测值为负, 相对误差的平均值为相对误差的绝对值平均; 验证钻孔位置为渤海饭店

相对误差较大的预测值主要出现在0~30 m的浅表层,最大可达28.71%,而深度30 m以下剪切波速预测值相对误差显著减小,多数小于10%。浅部误差较大的原因受到多种因素影响:①根据天津市第四系地层资料,天津市沉积地层全新统底板埋深18.6 m左右,上更新统底板埋深69.9 m左右,在预测与实测的 $V_s-H$ 关系图(图4)中可以发现,15~20 m左右实测曲线存在拐点。0~20 m波速曲线更陡,表明随土层深度增加,剪切波速并没有明显增大,这很好的匹配了全新统地层由于沉积时间较短,没有明显压实固结的沉积特征。而拟合曲线埋深20 m以下的中上更新统和中更新统地层部分,均经历更长时间的压实固结,表现出的特征更为一致。在拟合曲线中,大多数的数据均来自于埋深大于20 m的更新统地层。因此拟合曲线在0~20 m段的拟合优度偏低,导致相对误差较大;②在渤海饭店钻孔中,浅部(0~24 m埋深)的粘土层为淤泥质粘土,由于该种土类数量极少,因此被归为粘土型土类统计,也造成了预测值于实际值的较大偏差;③由于剪切波速随深度逐渐

增加,而相对误差的计算方法,在预测值与实测值的相同差值相同情况下,由于深部剪切波速值基数较大而使相对误差百分比较小。

对于不同沉积区域,剪切波速值存在一定区别,表现为二次多项式拟合模型中的常数 $a$ 差异较大,中心平原区为82.496大于滨海平原区65.064。因此在大多数情况下,相同深度和岩性情况下,中心平原区的剪切波速大于滨海平原区。这与沉积环境特征对应,在中心平原区以河流冲积和湖积的交互堆积为主,沉积物粒径相比滨海区域的滨海相沉积物粒径更大。在验证钻孔中,渤海饭店钻孔中,实测曲线的波动较为明显,这可能与滨海相沉积的沉积环境有关。因为滨海相沉积环境和滨海沉积物的情况较为复杂,其中既有陆源碎屑沉积,也会有潮间带的泥沙混合沉积物,甚至碳酸盐岩沉积。而中心平原区更为单一的沉积类型,使得实测波速曲线较为稳定。相应的预测值相对误差也更小。因此,区分不同沉积区域的剪切波速预测模型在天津地区可以提高预测准确性。



(a)明俊创基中心钻孔;(b)渤海饭店钻孔

图4 预测与实测的 $V_s-H$ 关系图

Fig.4 The relationship between the predicted and measured  $V_s-H$



对于同一钻孔数据,分土类预测波速和不区分土类预测波速与实测波速的相对误差非常接近,而总体数据相对误差的平均值不仅较为接近,甚至在明俊创基中心检验钻孔中,不区分土类的预测结果的准确度更优于区分土类的预测结果。因此,对于预测天津地区的剪切波速,区分土类与不区分土类预测差别不大,直接使用不区分土类预测模型可以更加简便快捷。从明俊创基中心与渤海饭店钻孔 $V_s-H$ 关系图(图4)可以看出,预测值与实测值在整体上基本吻合,区分土类的预测剪切波速曲线与不区分土类的预测剪切波速曲线趋势非常相近,两条曲线都非常靠近实测值,这体现了不区分土类的剪切波速预测模型在天津地区也具有很大的适用性。

综合上述讨论,本文认为在天津地区可采用区分沉积区域、不区分土类的剪切波速预测模型进行剪切波速预测,具有较高的实用性和易用性。使用本文推荐模型预测出的剪切波速具有较高的适用性和可靠性,可供实际工程参考使用,但需注意浅层给出的预测值可能存在较大误差。

## 5 结论

本文基于天津市场地剪切波速资料,对天津市平原区土层剪切波速与埋深间的关系进行相关性分析,主要获得如下结论:

(1)天津市土层剪切波速与埋深之间存在明显的正相关关系,而且剪切波速拥有随埋深变深增速变缓的趋势(即非线性相关)。天津地区的剪切波速预测推荐模型为模型二,获得了天津市区分沉积区域和不同土类的最优拟合公式。

(2)天津市平原区的第四系地层沉积特征与剪切波速结果相关性明显,浅层新地层拟合效果较差;同一埋藏深度下,受沉积环境影响,粒径大的沉积地层相较于粒径小的沉积地层,剪切波速更大。

(3)通过可靠性检验表明,区分土类与不区分土类预测结果的平均相对误差均在10%以内。在土类未知的情况下,使用不区分土类的拟合关系式进行剪切波速的预测可以获得较为合理的可靠性。

该研究结果可用于对天津平原地区土层剪切波速进行推测,可供天津市平原区的工程抗震等工作参考使用。

## 参考文献:

- [1] 何仲太,马保起,卢海峰.衡水市岩土体剪切波速与土层深度的关系[J].科学技术与工程,2014,14(35):90-96.
- [2] 李敏,杨立国,陈海鹏,等.杭州市典型土层剪切波速与埋深间的关系分析[J].震灾防御技术,2020,15(01):77-88.
- [3] 乔峰,薄景山,张兆鹏,等.广西柳州地区常见土类剪切波速与埋深之间的相关性[J].地震学报,2020,42(01):109-119+121.
- [4] 蔡润,彭涛,罗东林,等.成都地区土层剪切波速与埋深的关系[J].地震研究,2022,45(03):498-508.
- [5] 高武平,陈宇坤,任峰,等.天津滨海地区浅层剪切波速与基底构造关系研究[J].震灾防御技术,2012,7(2):130-136.
- [6] Lew M, Chieruzzi R, Campbell K, et al. Correlations of seismic velocity with depth[C]//International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics. Rolla, Missouri: Missouri University of Science and Technology, 1981.
- [7] 曾勇.土层的性质与剪切波速的关系[J].地震工程学报,1986,8(3):71-78.
- [8] 任瑞国,李宏伟,扈桂让.山西临汾市区土层剪切波速与埋深关系的研究[J].山西地震,2023(03):52-56.
- [9] 乔峰,阮雪飞,王亮,等.廊坊地区常规土类剪切波速与埋深之间的相关性[J].科学技术与工程,2023,23(15):6549-6559.
- [10] 蒋其峰,葛孚刚,魏玮.鲁西平原地区土体剪切波速与埋深关系研究[J].世界地震工程,2019,35(03):136-143.
- [11] 刘红帅,郑桐,齐文浩,等.常规土类剪切波速与埋深的关系分析[J].岩土工程学报,2010,32(7):1142-1149.
- [12] 王琦,刘红帅,郑桐,等.天津地区覆盖土层剪切波速与埋深的相关性分析[J].地震工程与工程振动,2018,38(6):190-201.
- [13] 天津市地质矿产局.天津市区域地质志[M].北京:地质出版社,1992.
- [14] 陈宇坤,李振海,邵永新,等.天津地区第四纪年代地层剖面研究[J].地震地质,2008,30(2):383-399.
- [15] 汪闻韶.土地震减灾工程中的一个重要参量——剪切波速[J].水利学报,1994(03):80-84+89.