

唐山市规划区土体剪切波速与深度的相关性分析

张金欢¹, 杨靖¹, 夏雨波², 田冀¹, 苏玲¹, 刘继东¹

(1. 河北省地质矿产勘查开发局第二地质大队(河北省矿山环境修复治理技术中心), 河北 唐山 063000;

2. 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170)

摘要:针对唐山地区岩土勘察及地震工程中剪切波速随深度的经验值尚无通用标准的问题,对规划区209个钻孔剪切波速数据进行研究。通过回归分析法,建立不同地质分区和岩性条件下的回归分析模型,利用决定系数 R^2 检验数据的拟合度,提出研究区的最优回归方程,并利用实际钻孔资料进行验证。结果表明,此次工作建立的回归方程式更准确、精度更高,可成为研究区工程开发建设的重要依据,并在节约成本、缩短工期等方面起到积极作用。

关键词:剪切波速;沉积相;土体类型;深度;回归方程

中图分类号: TU311.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2023)22-0148-06

剪切波速是介质中横向波的传播速度,可以提供地震反应分析所需的场地土动力参数。在划分建筑物场地抗震类别、判别砂土液化、计算场地地基卓越周期、地基刚度和阻尼比以及岩土工程勘察、地震安全性评价、地震小区划等方面有着重要的应用,因此在岩土工程、地震工程等领域有着很广泛的应用和研究意义^[1]。在实际工程中,尤其是地震工程一般均采用实测数据作为计算依据,但在实际操作中会出现很多不确定,如由于钻孔深度、土层埋藏条件、测试方法、钻孔孔内情况等诸多因素的影响,剪切波速无法完成或者测得的数据存在较大误差^[2]。另外《建筑抗震设计规范》规定,对丁类建筑及丙类建筑中层数不超过10层、高度不超过24 m的多层建筑,当无实测剪切波速时,可利用当地经验估算各土层的剪切波速^[3]。研究区(唐山新城)属于唐山市的新建城市规划区,大规模的工程建设也将快速开展,对同一区域重复进行剪切波速将加大工程成本投入,造成浪费及工期延后。所以准确确定研究区剪切波速经验值尤为重要。根据已有钻孔数据,以地质条件、岩土成因及特征等作为限制条件,推断出研究区不同地质单元、不同岩性的剪切波速经验值,将大大提高工作精度及效率,有利于节约成本,加快工程进度^[4]。目前已有许多学者从不同岩性、不同场地类别等对剪切波速进行了分析研究,结果表明,土层剪切波速与深度存在较强的相关性,并通过统计分析给出了更适合研

究区的相应的关系式^[5-13]。唐山市地质条件复杂,部分学者给出的全国性的经验公式或唐山市的经验公式显然不能更精准地表达研究区的剪切波速与埋深的关系,现搜集研究区(82.45 km²)内209个工程地质钻孔的波速资料,分析统计已有数据,对研究区内不同工程地质分区、不同岩性的剪切波速与埋深之间的关系给出回归模型,为研究区后期大规模的工程建设和开发提供参考。

1 研究区地质条件概况

研究区地处燕山南麓滦河冲洪积扇体系,属于滦河中晚更新世冲洪积扇。北部山前为晚更新世滦河冲洪积扇,其南部为滦河扇上三角洲,二者之间无明显的分界线,滦河从更新世至现代,由西向东频繁改道,形成了由西到东的一系列相互叠置的冲积扇,共同组成了冲积扇体系。自第四纪以来滦河冲积扇,多次发生袭夺、改道东迁,先后形成三期冲洪积扇堆积(每期产生多次扇相堆积)。早更新世早期形成了以丰润为顶点的第一期冲洪积扇。早更新世晚期滦河改道东迁在雷庄、滦县县城之间进入山前平原,形成了以西峡口为顶点的第二期冲洪积扇。晚更新后于滦县进入山前地带,形成以滦县为顶点三期冲洪积扇,且内迭于第二期冲洪积扇内,将老冲洪积扇分为东西两个部分。研究区位于燕山南麓,海拔1~33 m,呈北东高,南西低趋势。研究区以北燕山山区持续抬升,南部平原相对沉

收稿日期:2022-08-19

基金项目:唐山市地方财政资金(YTZB-2021-012)。

作者简介:张金欢(1980—),女,河北唐山人,河北省地质矿产勘查开发局第二地质大队,高级工程师,研究方向为工程地质和城市地质;通信作者刘继东(1970—),男,河北唐山人,河北省地质矿产勘查开发局第二地质大队,正高级工程师,研究方向为地球物理勘查和城市地质。

降,因而发育滦河冲积扇,主体为滦河冲积扇区扇中至扇缘区域。区内主要地貌单元为全新世冲洪积区、晚更新世冲洪积区及全新世湖沼积区。

研究区前第四纪地层被第四纪松散沉积物覆盖,前第四系顶界埋深为 100~310 m。

区域大地构造位置处于中朝准地台(I_2)、燕山台褶带(II_2^{28})、马兰峪复式背斜(III_2^{28})的开滦台凹(IV_2^{28})之上。在近场区历史上发生过 4.7 级以上地震 26 次,其中 M4.7~M4.9 级地震 15 次,M5.0~M5.9 级地震 10 次,M7.8 级地震 1 次,为 1976 年 7 月 28 次唐山地震。1976 年 7 月 28 日河北唐山 7.8 级地震就发生在近场区内,震中位于工作区的东南部,距离工作区约 7 km,对工作区影响最大。

根据本次实施的 2 个工程地质与第四纪地质综合研究孔,通过地层年代测试、颗粒分析、孢粉样品分析等,结合前人在该区的工作成果,揭露研究区全新世地层较薄且近乎无,地表受人为改造较大,主要发育于唐山新城东南,厚度一般为 1~2 m,工作区中部大部分地区均为浅表 0~1 m 的表层土;晚更新世西甘河组(Q_{p3x})底界埋深为 25~42 m,地层埋深整体表现为中部较浅,南北较厚的特征。唐山站一带,晚更新世底界埋深最浅,深度为 25 m 左右;南部和北部底界埋深为 30~40 m。中更新世肃宁组(Q_{p2s})底界埋深 60~103 m,呈现南浅北深的特征,北部三女河一带,底界埋深约 100 m。早更新世饶阳组(Q_{p1r})底界埋深为 100~180 m,即第四纪地层底界埋深,整体上中部偏浅,南北两侧偏深。

2 剪切波速数据来源

本次工作共收集研究区(82.45 km²)内 209 个 80 m 工程地质钻孔,共 6252 点次剪切波速数据资料,孔间距均约为 700 m 的空间分布(图 1),剪切波速采用 XG-I 悬挂式波速测井仪,采样间隔为 1 m,从横向和纵向来说对于研究区均具有代表性及高精度。研究区内晚更新世冲洪积区分布 180 个钻孔,全新世湖沼积区分布 11 个钻孔,全新世冲洪积区 23 个钻孔。本次工作旨在通过分析整理区内 209 个剪切波速数据,利用三种常用的回归方程对数据进行拟合,推荐更适合本区的土层剪切波速与深度间的关系式。拟合优度越高,代表回归方程精确度越高,得到的结果也越接近实际。

3 统计分析结果

从不同工程地质分区和不同岩性两个方面对土层剪切波速与深度间关系进行分析,通过对比分析推荐更适合不同工况下的回归模型。

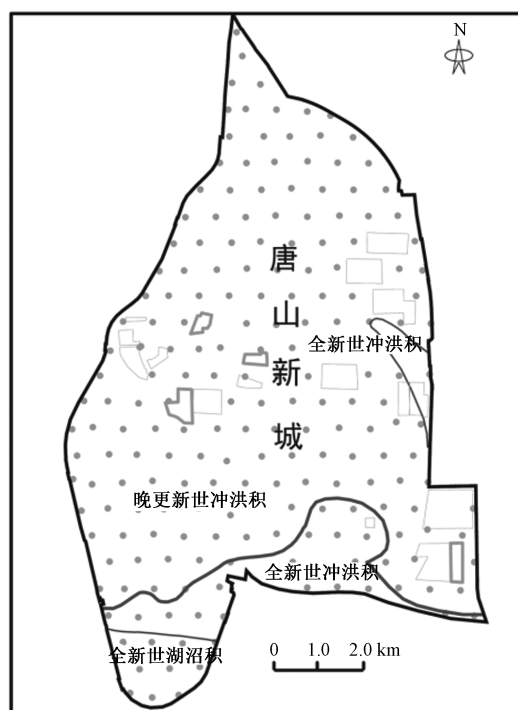


图 1 唐山市规划区工程地质分区及波速测试孔分布

3.1 不同工程地质分区

根据统计到的实测数据,通过 EXCEL 绘制地区内冲洪积地层和湖沼积地层的土层剪切波速与深度间的散点图(图 2)。根据以下三种回归模型找出最优模型(表 1)。

模型 1:线性函数。

$$V_s = a + bH \quad (1)$$

模型 2:幂函数。

$$V_s = cH^d \quad (2)$$

模型 3:二次函数。

$$V_s = a + bH + cH^2 \quad (3)$$

式中: V_s 为土体剪切波速值,m/s; H 为土层埋藏深度,m; a 、 b 、 c 、 d 为拟合参数。

由图 2 和表 1 可知,无论是哪种工况,剪切波速值与土层埋深均为正相关,增幅随埋深变缓;沉积环境对剪切波速存在一定影响。在不考虑工程地质分区(不分沉积环境)和晚更新世冲积区两种工况中幂函数模型拟合度更高;在全新世冲积、湖沼积区二次函数两种工况中的拟合度更高。

晚更新世冲积区工程地质分区位于山前冲洪积扇中段,岩性多变、分选性较差,与其他分区相比未形成更加稳定的规律性。全新世冲积区虽然也属于冲积地层,但其位于冲积扇相对前缘,水动力相对中段有所减弱,颗粒相对较细、分选性较好,故全新世冲积区工程地质分区内剪切波速的拟合度优于晚更新世

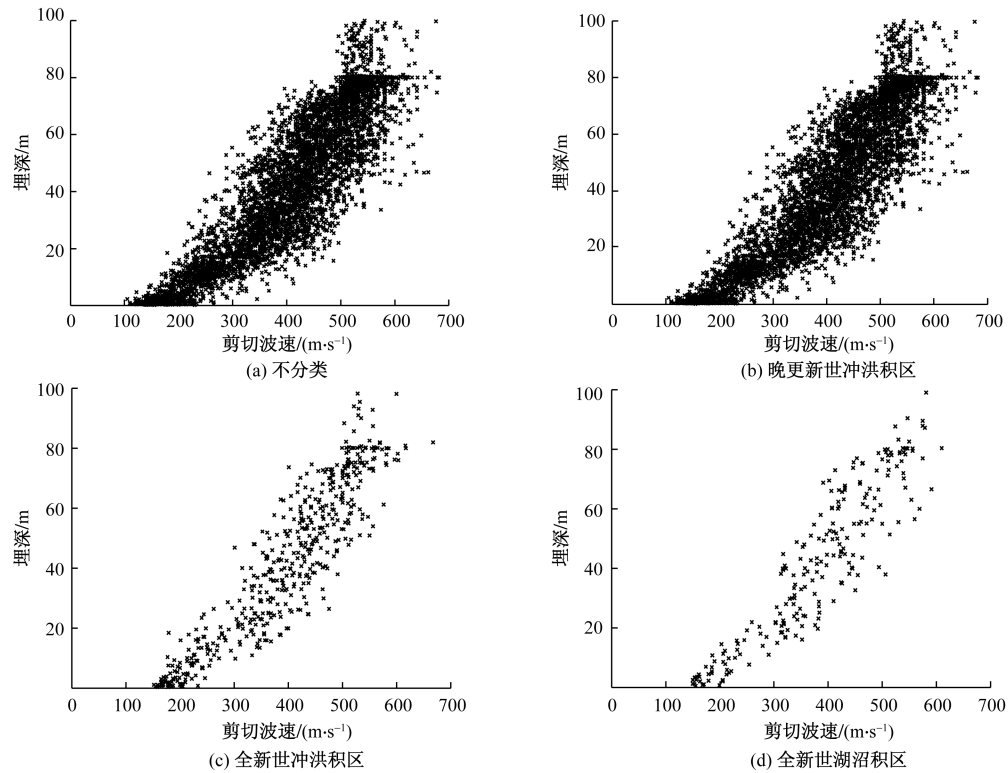


图 2 不同工程地质分区的剪切波速与土层深度关系散点图

表 1 不同工程地质分区剪切波速与土层深度的经验关系拟合参数

数据分类	模型	参数值					最优模型
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>R</i> ²	
不分沉积环境	模型 1	237.94	3.841 0			0.755 8	
	模型 2			144.42	0.287 2	0.809 1	●
	模型 3	194.25	6.360 0	0.025 0		0.802 3	
晚更新世冲积区	模型 1	239.63	3.825 0			0.753 0	
	模型 2			145.49	0.285 9	0.808 1	●
	模型 3	195.32	6.361 7	0.025 0		0.800 7	
全新世冲积区	模型 1	223.28	4.015 7			0.826 9	
	模型 2			141.22	0.290 9	0.824 0	
	模型 3	192.58	5.700 8	−0.015 5		0.847 7	●
全新世湖积区	模型 1	204.71	4.150 4			0.840 0	
	模型 2			123.95	0.313 7	0.858 4	
	模型 3	171.80	6.471 9	−0.026 5		0.861 7	●

冲积区。湖沼积地层,水动力最弱,接近静水沉积,颗粒分选好,岩性相对单一,数据拟合度最高。

3.2 不同岩性

为了更好更深入地了解区内剪切波速与埋深间的关系,拟合出更为合理、精定更高的关系式,以岩性作为数据的分类标准,判定不同岩性条件下的剪切波速与埋深的拟合关系式,如图 3 和表 2 所示。

①总体上剪切波速值与土层深度正相关,增幅随埋深变缓。②不同岩性的剪切波速值均与土层埋深呈正相关,且幂函数拟合度最高。③各岩性土层,颗粒越细,拟合度越高,颗粒越粗,拟合度越差。其中黏

土、粉质黏土、粉土、粉细砂的回归模型拟合度较好,大于 0.75;中粗砂、砾砂、圆砾、卵石的拟合度较差,为 0.5~0.7。由于本区地层主要以冲洪积扇为主,粗颗粒地层的填充物岩性成分复杂,存在黏性土、粉细砂、中粗砂、砾砂等多种岩性,故粗颗粒地层的剪切波速值与深度间的离散性相对较大,回归模型的拟合度较低。④除了卵石层回归方程式为二次方程最优,其余岩性均为幂函数方程式最优。

4 实例验证

分别用本区内已完成项目左岸景林长虹苑 C 区 ZK01 钻孔的实测值检验不同条件下得到的回归

方程式的可靠性和精确度,并与刘红帅等^[5]给出的全国范围内常规划土类剪切波速与埋深间的回归模型(以下简称“刘模型”)和王广军和苏经宇^[13]提到的唐山模型(简称“王模型”)进行对比分析,并且给出各土层的相对误差值,如表 3 所示。

由表 3 可知,本次模型明显优于刘模型和王模

型。9 层数据中,本次三种模型中均只有 1 个数值误差大于 10%;而王模型和刘模型均有 5 个数据误差大于 10%,对于研究区本次模型更优。对比本次模型的三种不同情况:对于黏性土,按不同岩性确定的回归方程误差更小;对于细砂则是按沉积相分类和不分类的误差更小。

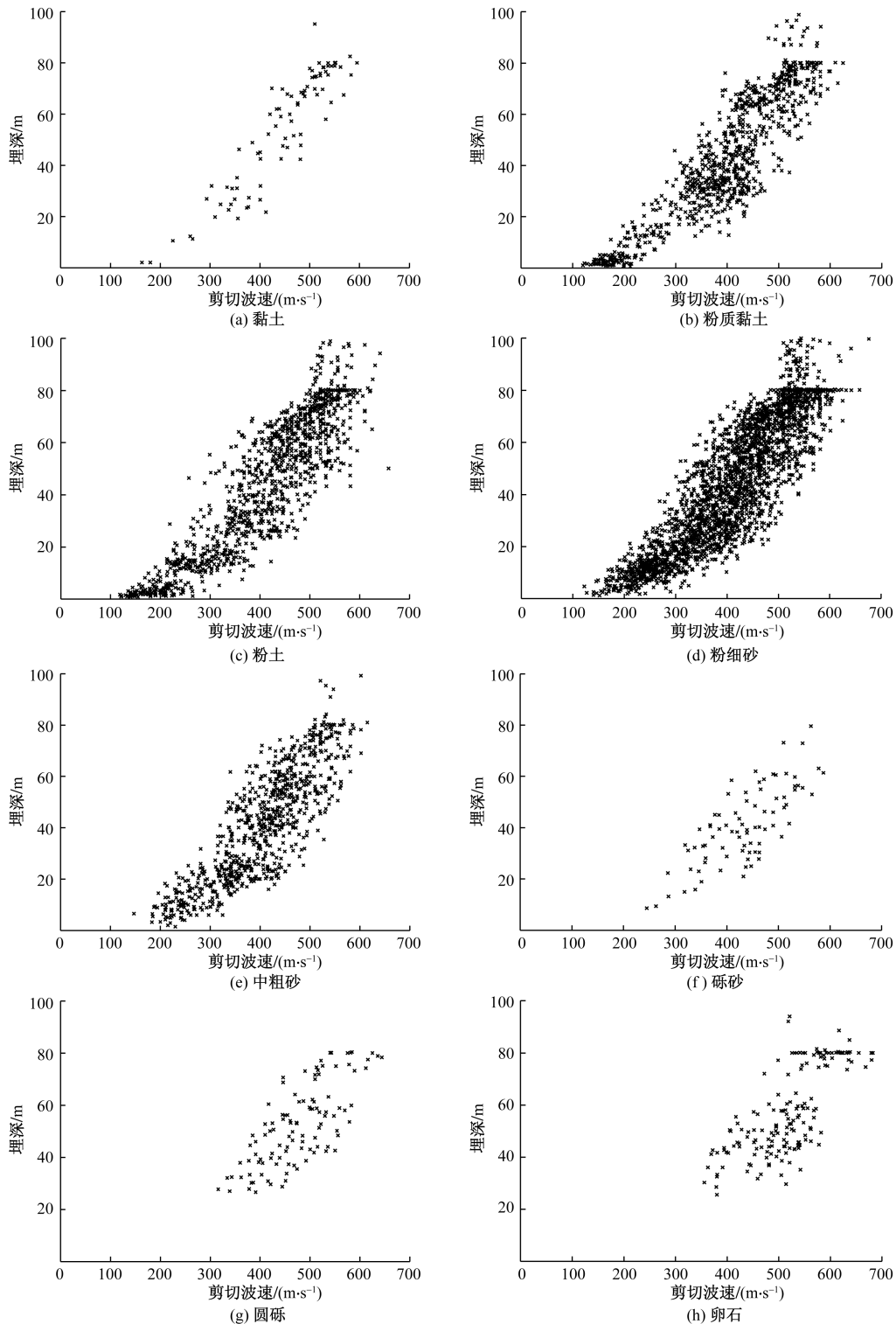


图 3 不同岩性的剪切波速与土层深度关系散点图

表 2 不同岩性回归模型的拟合参数和拟合优度

数据分类	模型	参数值					最优模型
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>R</i> ²	
不分岩性	模型 1	237.94	3.841 0			0.755 8	
	模型 2			144.42	0.287 2	0.809 1	●
	模型 3	194.25	6.360 0	0.025 0		0.802 3	
黏土	模型 1	246.53	3.623 2			0.821 1	
	模型 2			120.10	0.333 8	0.879 1	●
	模型 3	190.63	6.504 3	0.028 8		0.852 1	
粉质黏土	模型 1	219.35	4.124 4			0.792 6	
	模型 2			125.67	0.317 7	0.851 8	●
	模型 3	171.34	7.333 9	−0.037 1		0.830 4	
粉土	模型 1	222.42	4.156 3			0.796 6	
	模型 2			129.70	0.315 0	0.849 6	●
	模型 3	181.13	7.217 6	−0.035 8		0.829 1	
粉细砂	模型 1	237.31	3.830 0			0.774 1	
	模型 2			114.43	0.344 5	0.800 8	●
	模型 3	199.65	6.165 6	−0.025 8		0.791 1	
中粗砂	模型 1	263.08	3.396 1			0.703 9	
	模型 2			129.50	0.314 2	0.759 7	●
	模型 3	224.54	5.499 2	−0.021 5		0.738 2	
砾砂	模型 1	276.88	3.839 6			0.578 1	
	模型 2			127.08	0.333 8	0.616 4	●
	模型 3	236.99	6.019 6	−0.026 0		0.587 9	
圆砾	模型 1	300.83	3.407 0			0.546 5	
	模型 2			111.73	0.369 2	0.551 9	●
	模型 3	262.05	4.961 8	−0.014 3		0.548 7	
卵石	模型 1	327.49	3.393 9			0.548 2	
	模型 2			117.99	0.368 4	0.521 5	
	模型 3	346.12	2.715 0	0.005 7		0.548 4	●

表 3 左岸景林长虹苑 C 区 ZK1 号钻孔

土的名称	埋深/m	剪切波速/ (m·s ⁻¹)	本文模型						王模型		刘模型	
			不分		不同工程地质分区 (晚更新世冲积区)		不同岩性					
			计算值/ (m·s ⁻¹)	误差/%	计算值/ (m·s ⁻¹)	误差/%	计算值/ (m·s ⁻¹)	误差/%	计算值/ (m·s ⁻¹)	误差/%	计算值/ (m·s ⁻¹)	误差/%
素填土	1.3	149	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
粉土	3.5	194	207	6.6	208	7.2	192	0.8	214	10.3	177	8.8
细砂	10.2	262	281	7.5	283	8.2	255	2.7	300	14.8	225	14.1
粉质黏土	11.9	232	294	26.6	295	27.1	276	18.8	316	35.8	232	0.3
细砂	21.4	353	348	1.3	349	1.0	329	6.8	380	7.7	278	21.3
粉质黏土	22.4	331	353	6.7	354	7.0	337	2.1	386	16.6	286	13.5
细砂	28.6	402	378	5.9	379	5.6	363	9.7	417	3.6	309	23.3
粉质黏土	31.3	361	388	7.7	389	8.0	375	4.1	429	18.9	327	9.4
细砂	80.0	538	508	5.4	509	5.3	518	3.7	577	7.4	463	13.7
平均值				8.5		8.7		6.8		14.4		13.7

5 结论

采用回归分析法对唐山新城 209 个钻孔实测波速数据资料进行统计分析,利用三种常见的回归模型分析比对,通过对比不同地质单元和岩性的拟合度结果,总结出更适合本研究区不同工况条件的回归方程式,并通过实测波速数据的验证,证明了该组经验方程的有效性。

结果表明:①研究区各类土体(填土除外)的剪切波速与埋深均正相关,增幅随深度渐缓。②回归方法的决定系数与颗粒大小相关。细颗粒决定系数大,回归方程更准确,粗颗粒决定系数小,回归方程拟合度低。③本次回归模型砂性土的决定系数较黏性土普遍略小。④不同沉积回归模型的拟合结果显示,地质环境对剪切波速与埋深间的关系存在一定影响。

参考文献

- [1] 化建新,郑建国,等.工程地质手册(第五版)[M].北京:中国建筑工业出版社,2018.
- [2] 薛峰,王庆良,胡亚轩,等.西安市岩土体剪切波速与土层深度关系的研究[J].地震工程学报,2014,36(2):249-255.
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部.GB50011—2010 建筑抗震设计规范[M].北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 岳庆霞,于一浦,杨彬,等.山东临沂地区砂土剪切波速与标准贯入击数关系统计分析[J].世界地震工程,2023,39(2):220-229.
- [8] 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(3):498-508.
- [9] 周浪.波速测试技术在岩土工程勘察中的应用[J].四川地质学报,2021,41(S2):63-65.
- [10] 宋健,师黎静,党鹏飞,等.哈尔滨市剪切波速与埋深相关性分析[J].建筑结构,2020,50(S1):1088-1092.
- [11] 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(1):77-88.
- [12] 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(1):109-119.
- [13] 王广军,苏经宇.连云港碱厂层状土剪切波速沿深度变化的推测[J].勘察科学技术,1986(3):35-38.

Correlation Analysis of Soil Shear Wave Velocity and Depth in Planning Area of Tangshan City

ZHANG Jinhuan¹, YANG Jing¹, XIA Yubo², TI Ji¹, SU Ling¹, LIU Jidong¹

(1. No. 2 Geological Brigade of Hebei Provincial Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Tangshan 063000, Hebei, China; 2. Tianjin Institute of Geology and Mineral Resources, Tianjin 300170, China)

Abstract: Aiming at the problem that there is no universal standard for the empirical value of shear wave velocity with depth in geotechnical investigation and seismic engineering in Tangshan area, the shear wave velocity data of 209 engineering geological boreholes in the planning area of Tangshan City as the research object was selected, the regression analysis method was adopted, and the regression analysis model under different geological zones and different lithology conditions was established. The fitting degree of the data was tested by the R^2 value of the determination coefficient, and the optimal regression equation was proposed in the study area, and the regression equation was verified by the actual drilling data. The verification results show that compared with the two existing models in the research area, the regression equation established in this work is more accurate and has higher precision, which can become an important basis for the development and construction of the research area, and play a positive role in saving costs, shortening the construction period and improving work efficiency.

Keywords: shear wave velocity; depositional facies; soil type; depth; regression equation