

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20221205001

伶仃洋海域土剪切波速预测方法研究*

徐雨¹, 吴琪¹, 方怡^{1,3}, 陈国兴^{1,2}

(1. 南京工业大学岩土工程研究所, 江苏南京 210009; 2. 江苏省土木工程防震技术研究中心, 江苏南京 210009;
3. 国家自然灾害防治研究院, 北京 100085)

摘要: 海床土体剪切波速(V_s)是确定海床场地设计地震动参数及土-海洋工程结构体系动力分析所必须的一个基本的土动力参数。结合某伶仃洋跨海通道海床钻孔实测 V_s 剖面,基于目前现有的研究成果,分别采用线性模型、二次多项式模型、幂函数模型和对数函数模型对比分析了陆域土 V_s 与深度 H 的经验关系式对该海域土 V_s 的适用性,得出结论如下: V_s - H 关系的二次多项式模型适用于该海域砂类土(粗砂、细砂、粉砂) V_s 的预测, V_s 均随 H 的增大而增大;现存的陆域土 V_s - H 关系不适用于该海域黏性土(粉质黏土夹砂、粉质黏土) V_s 的预测。引入土的密度 ρ 作为另一变量,建立了基于双变量 H 和 ρ 的海域黏性土 V_s 的预测模型。此外,该海域淤泥和淤泥质土由于埋深较浅、土质柔软,其 V_s 与 H 无明显的相关性。该成果可为伶仃洋海域工程建设中海床土体 V_s 的确定提供科学的预测依据。

关键词: 海域土; 剪切波速; 土层深度; 土的密度; 预测方法

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2023)05-0956-09

Evaluation Method of Shear Wave Velocity of Various Marine Soils in the Lingdingyang Bay

XU Yu¹, WU Qi¹, FANG Yi^{1,3}, CHEN Guoxing^{1,2}

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 210009, China;

2. Civil Engineering and Earthquake Disaster Prevention Center of Jiangsu Province, Nanjing 210009, China;

3. National Institute of Natural Hazards, Beijing 100085, China)

Abstract: The shear wave velocity V_s plays a critical role as a fundamental indicator of soil dynamic properties, especially in the context of s. This information is essential for establishing design ground motion parameters for seabed sites. In this study, combined with the measured shear wave velocity profiles from the boreholes of a seabed section across the Lingdingyang Bay, the applicability of the existing empirical equations between V_s and depth H for land soils to marine soils V_s in the bay was examined using linear models, quadratic polynomial models, power function models, and logarithmic function models. Results indicate that the existing quadratic polynomial correlation between V_s and depth H for land soils is applicable for estimating V_s values of marine sandy soils (coarse sand, fine sand, fines sand) in the bay. However, none of these models are applicable for assessing V_s values of marine clayey soils (silty clay with sand, silty clay). The density of soil ρ is introduced into the equa-

* 收稿日期:2022-12-05;修回日期:2023-02-11

基金项目:国家自然科学基金项目(51978334)、国家重点研发计划项目(2017YFC1500403)资助

作者简介:徐雨(1998—),女,硕士。主要从事土动力学研究。E-mail: yux0207@126.com

通讯作者:陈国兴(1963—),男,教授,博士。主要从事土动力学与岩土地震工程研究。E-mail: gxc6307@163.com

tion to evaluate the V_s as an additional variable, the V_s prediction equation using two variables ρ and H is established for marine clayey soils in the bay. In the case of marine muck and mucky soils, characterized by shallow burial and soft soil, there is no significant correlation between the V_s and H . The results provide a scientific evaluation basis for determining the V_s values of marine soils within the bay, which is crucial for guiding project construction decisions and ensuring the safety and integrity of offshore structures in the area.

Keywords: Marine soil; shear wave velocity; soil depth; soil density; prediction method

0 引言

海洋强国战略的实施要求提高海洋资源开发能力,发展海洋经济。沿海区域城市间快捷运输的跨海通道将对我国海洋强国建设提供强有力的支撑作用。被伶仃洋隔断的珠江口两岸城市群,正被跨海大桥以及过江通道等,构建起跨海跨江通道群,为粤港澳大湾区人员、物流的流通与都市圈的协同发展等发挥重要作用。

海洋工程场地的地震安全性评价是一个亟需解决的科学问题。海洋工程设计地震动参数是通过海床场地地震反应分析确定的^[1],海床地层的剪切波速(V_s)是海床场地地震反应分析所必须的一个基本的土动力参数。但在实际海洋工程场地勘察过程中,常受海上条件限制,海上岩土勘探难度大、耗时长、钻孔易坍塌,海床 V_s 的直接测试难度大、精度低、费用高,通常仅能揭示极为有限海域地层钻孔处的 V_s 剖面,且测试数据存在较大的不确定性。因此,如能依据宝贵的海域剪切波速测试资料,建立区域性海域的 V_s 经验预测方程,则可为该海域的工程建设提供重要的科学参考依据。

土的基本动力特性参数 V_s 表征了场地土的刚度大小或软硬程度,既是评价土壤地震液化的一个基本参数,如一些学者提出了基于 V_s 的场地液化评价方法^[2-5];也是划分场地类别的重要指标^[6-8]。此外,兰景岩等^[9]发现在一定范围内的 V_s 变化对场地设计反应谱产生显著影响,场地特征周期 T_g 随 V_s 增大而减小。

许多学者针对不同区域场地土开展了 V_s 的经验预测方程研究。H.B.Seed等^[10]基于原位测试资料,建立了修正标贯击数 N_1 与 V_s 的经验关系式。陈国兴等^[11]发现幂函数为描述南京城区浅层软土 V_s 与深度 H 间相关性的适宜函数形式。朱姣等^[12]针对苏州第四纪深厚地层的大量剪切波速实测资料,

研究发现:不同深度 H 范围内土层的平均剪切波速间存在显著相关性,据此建立了基于浅层 V_s 外推深层 V_s 的逐步外推法。刘红帅等^[13]提出了常规土类中现场实测 V_s 与 H 关系的多项式回归模型。战吉艳等^[14]基于苏州第四纪深厚地层钻孔 V_s 资料,建立了以线性函数和幂函数分段表征 V_s 随 H 变化的经验公式。上述成果为深入认识陆域土 V_s 随 H 的变化提供了有益的科学数据,但有关海域土 V_s 随 H 变化的研究极为少见。黄雅虹等^[15]发现渤海海域饱和黏性土 V_s 与抗剪强度 S_u 存在实际幂函数相关性;荣棉水等^[16]和裴强等^[17]采用不同的函数形式研究了渤海海域土的 V_s 随 H 的变化。周杨锐等^[18]针对渤海和南海的不同浅层土,通过三种不同函数形式,探讨了不同类型土的 V_s 与 H 的关系。因海域地层条件复杂且 V_s 资料稀少,已有的海域 V_s 经验方程的普适性较差,难以满足不同海域场地的地震安全性评价对各类海洋土 V_s 的经验预测要求。

本文依据伶仃洋海域港珠澳大桥场址的钻孔 V_s 数据,探讨了伶仃洋海域土 V_s 的经验预测方法,对比了现有预测模型对不同类型海洋土的 V_s 随 H 变化的适用性,提出了该海域海洋土 V_s 的预测模型。

1 海域地震环境与场地特征

伶仃洋位于我国东南沿海地震带。该地震带北起浙江南部,南至广东雷琼和广西地区,属我国东部强地震带。如图1所示,港珠澳大桥横跨伶仃洋,其东、西部均为低山丘陵区,中部约35 km为伶仃洋海域。大桥所在的西部海域,海底地形平坦,水深大于10 m的区域约5.8 km,位于伶仃西航道和铜鼓航道(海底隧道段)水域,最深处约17 m,九州桥以西海域水深小于4 m,九州桥至青州桥以东6 km海域的水深5~7 m。海水等深线呈北北东走向,海底呈缓慢向东下降趋势。场址及邻近区域分

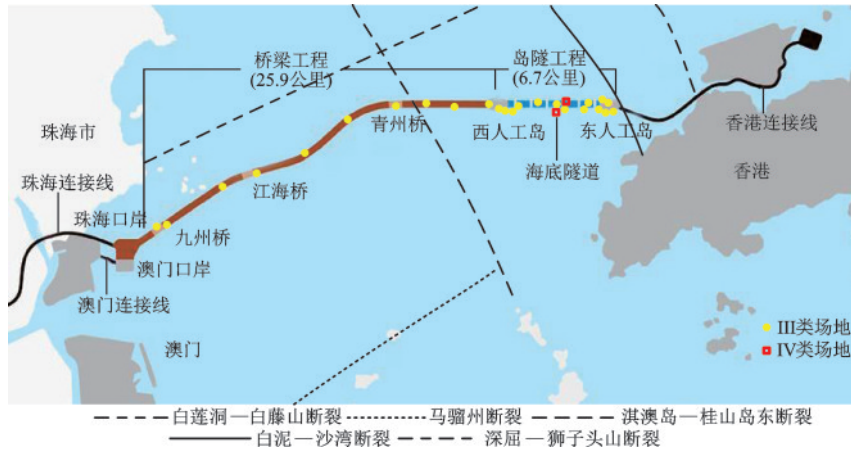


图1 港珠澳大桥地理位置及波速测试钻孔分布

Fig.1 The geographical position of the Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge and borehole locations

布五条地震断裂带:白莲洞—白藤山断裂带、马骊州断裂带,淇澳岛—桂山岛东断裂带、白泥—沙湾断裂带,深屈—狮子头山断裂;桥址通过段无全新世活动断裂。

伶仃洋及其周边区域(112°00′~115°30′E, 21°30′~24°00′N),1970~2013年发生 $M_L \geq 4$ 级地震27次,其中, $M_L 5.0$ 以上地震3次,最大震级 $M_L 5.2$;桥址区5 km内无 $M_s \geq 4.7$ 级破坏性地震记载^[19]。东南沿海地震带地震活动在时间上表现出明显的周期性,1400~1710年为第一活动周期,1711年至今为第二活动周期。这表明,伶仃洋的地震活动性较弱,其地震影响兼具一定的周期性。

图1显示了剪切波速测试钻孔点的分布概况。岩土勘察钻孔揭示:海中桥隧主体工程在勘探深度内覆盖层厚24.0~89.3 m,主要为全新世及晚更新世海相、陆相沉积物,不同地段基岩风化的差异显著。按时代、成因、岩性、物理力学性质等特征,上覆地层可划分为5层、27个亚层。①层为全新世海相沉积物和陆相冲积物,其岩性为淤泥、淤泥质黏土和淤泥质黏土夹砂,分布范围广泛,厚度8~32 m,海域中部大于35 m,最厚处达42.3 m。②层为晚更新统晚期陆相沉积物,呈断续分布,局部孔段缺失,层厚较薄;③层为晚更新世中期海相冲积物;④层为晚更新世早期河流相冲积物;⑤层为花岗岩风化残积物。海底隧道段海床浅层存在较大厚度的流塑-软塑黏土层、中部为中-高压压缩性黏土、下部为低压缩性砂土;大桥段海床上部为软土层、下部为土质不均的砂土层,青洲桥处该层夹有2.7~7.4 m厚的圆砾土和呈透镜体分布的软~可塑状粉质黏土;

江海桥处该层夹有呈透镜体分布的软~可塑状粉质黏土。九州桥处海床以淤泥和中软土层为主,覆盖层厚约41 m。采用井下三分量检波器、单孔检层法测试钻孔的剪切波速,测试得到的24个钻孔的 V_s 剖面如图2所示。各钻孔海床地表以下20 m深度内的等效剪切波速 $V_{s20} = 80 \sim 120$ m/s。关于海域场地类别如何确定,目前尚无规范可依。依据《建筑抗震设计规范》^[20]给出的陆域场地分类方法,除隧道段个别钻孔处为IV类场地外,其余钻孔处均为III类场地。

2 基于深度的海洋土 V_s 预测方法

国内外已有许多学者开展了剪切波速 V_s 的预测方法研究^[11-14, 16-18, 21-26]。目前的主流方法为基于场地的物理参数对现场量测的 V_s 进行归准,拟合出 V_s 预测模型。 V_s 随土的深度 H 而明显变化,总体上, V_s 随 H 的增大而增大(图2)。 V_s 随 H 的变化规律因场地地质特征和土的类型不同而存在显著差异,预测 V_s 的函数形式也会有所不同^[12-14, 22]。表1给出了表征 V_s 与 H 相关性的代表性函数形式。

现有研究成果表明,海域土由于特殊性和区域性,其与已有陆地土的动力特征研究成果有较大差别^[27]。海底地貌分海蚀地貌和海积地貌,分布不均匀,不同土性 V_s 差别较大,将所有钻孔土样按照土体类别进行分类,图3给出不同钻孔剖面 V_s 随 H 的发展趋势。可以发现:淤泥和淤泥质土 V_s 随 H 增大而增大的幅度较小,其余土类 V_s 均随 H 增大而明显增大;此外,所有土类的 V_s 均小于450 m/s。

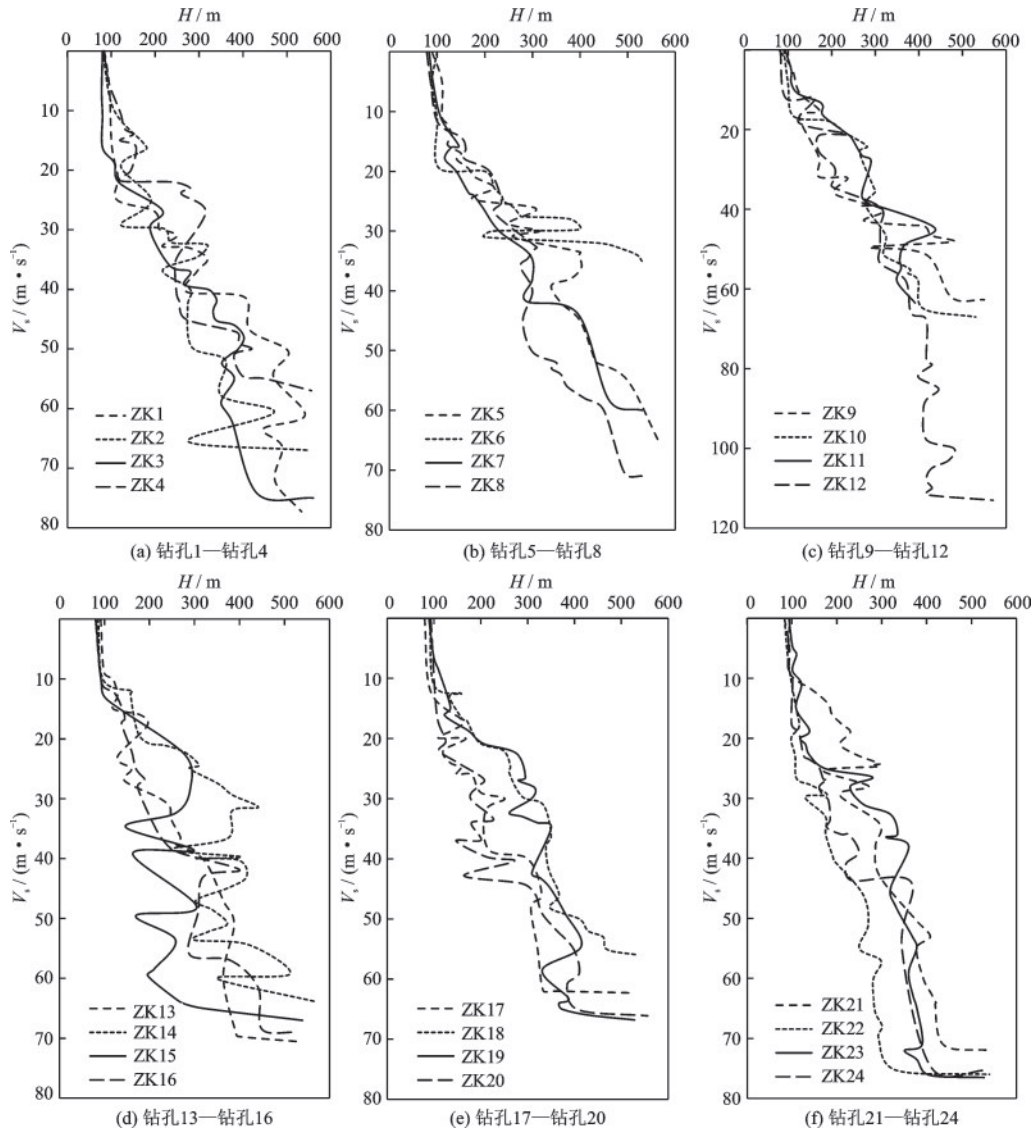


图2 钻孔处的剪切波速 V_s 剖面

Fig.2 Shear-wave velocity V_s profiles at the borehole locations

表1 基于土层深度 H 的预测 V_s 的代表性函数形式

Table 1 Typical function forms for predicting V_s based on soil depth H

模型类别	经验公式	适用场地	文献
线性函数模型(1)	$V_s = a_1 + b_1H$	昆明盆地 南京城区	李存志等 ^[21] 陈国兴等 ^[11]
二次多项式函数模型(2)	$V_s = a_2 + b_2H + cH^2$	福建沿海盆地 苏州城区丘陵分区	董菲蕃等 ^[22] 朱姣等 ^[12]
幂函数模型(3)	$V_s = a_3H^{b_3}$	下辽河平原区 合肥膨胀土地区 渤海、南海海域	齐鑫等 ^[24] 高玉峰等 ^[23] 周杨锐等 ^[18]
对数函数模型(4)	$V_s = a_4 + b_4 \ln H$	—	—

注: a, b, c 为拟合参数, 其中 a 为无初始固结应力状态对应的海域土 V_s, b, c 反映了 H 对海洋原状土的影响程度

这表明, 该区域海床 V_s 的大小确实受 H 的影响, 其影响程度与土类密切相关, 高塑性土的 V_s 受 H 的

影响极小。故 V_s 与 H 的相关性应区分土类进行讨论。

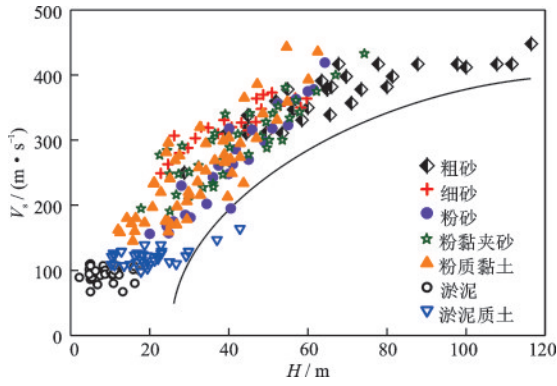


图3 所有各类土 V_s 与 H 的相关性

Figure 3 Correlations between V_s and H for various types of soils
 主体工程海床表层主要为土质柔软的淤泥及淤泥质土。由图4可知,淤泥的 V_s 基本介于 80~110 m/s, $H < 20$ m; 淤泥质土的 V_s 基本介于 100~140 m/s, 其 $H = 10 \sim 50$ m。这两类土的 V_s 与 H 无明显的相关性。海床中除淤泥和淤泥质土以外,

还广泛分布有粗砂层、细砂层、粉砂层、粉黏夹砂层和粉质黏土层,其中,粗砂、细砂和粉砂层的 $H > 20$ m, 粉黏夹砂和粉质黏土层的 $H > 10$ m。图5给出了不同土类 V_s 随 H 的变化趋势,对比分析了不同函数形式的预测模型对不同土类的适用性。上述五种土类 V_s 均呈现随 H 增大而增大的趋势。图6对比分析了现有的 V_s - H 函数形式对海床各类土 V_s 量测数据的拟合效果。发现表1中所列的不同函数形式对砂土(粗砂,细砂,粉砂) V_s 的量测数据均有较好的拟合效果,且以两次多项式函数模型(2)的拟合优度最佳,模型(2)可作为预测海床中砂类土 V_s 随 H 变化的适宜模型,但现有函数模型对该海床中黏性土(粉黏夹砂,粉质黏土) V_s 的量测数据的预测效果不理想,需另行建立基于 H 的预测 V_s 的有效方法。

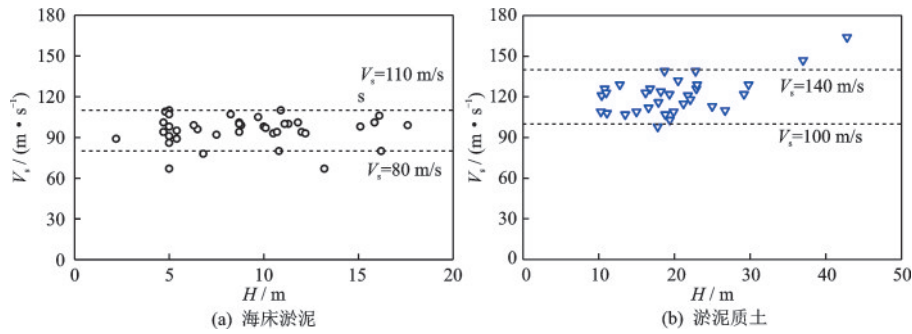


图4 海床淤泥、淤泥质土 V_s 与 H 的相关性

Fig.4 Correlations between V_s and H for marine muck and mucky soils

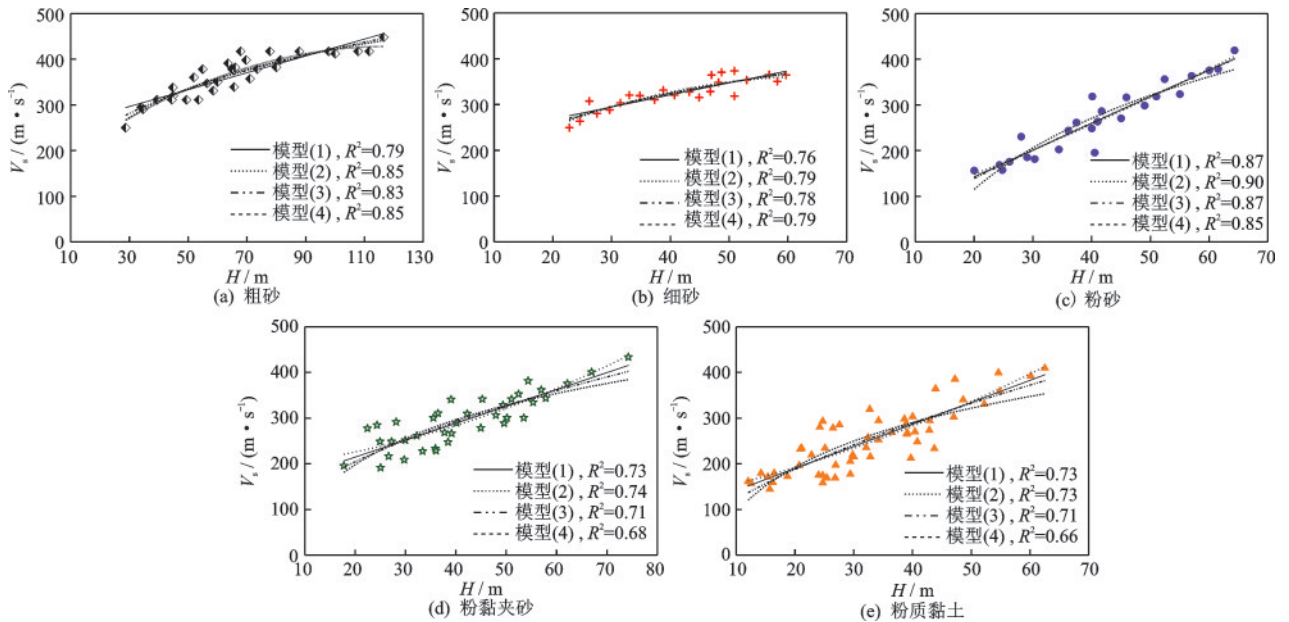


图5 各类海洋土 V_s 随 H 变化的量测结果与文献中不同 V_s - H 关系的对比

Fig.5 Measured V_s data with H for various types of marine soils and variations of the V_s with H in the literature

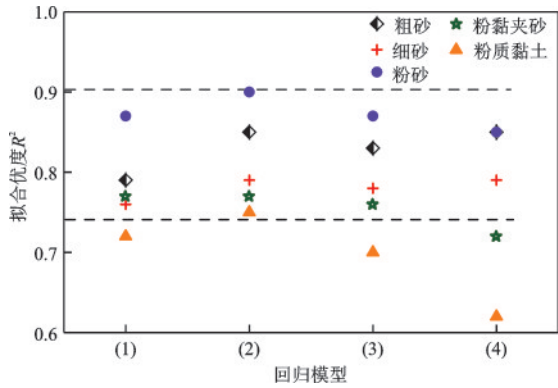


图6 不同 V_s - H 关系对各类海洋土 V_s 量测结果的拟合度 R^2 的对比

Fig.6 Comparison of the R-square values of various forms of V_s versus H for the measured V_s data of various marine soils

3 海洋黏性土 V_s 预测的优化模型

鉴于以单一因素 H 作为自变量的多项式函数模型(2)不适宜预测该海床黏性土 V_s 随 H 变化,以

及王海等^[28]以相对密度 D_r 与抗液化强度相关性为基础,分析砾性土 D_r 与 V_s 内在关联性,发现砾性土 V_s 与 D_r 呈良好线性关系。依据实验数据进行分析研究,结果表明:随着 H 增大,部分黏性土密度 ρ 没有明显的变化趋势,但引入 ρ 作为另一变量,可建立预测海床黏性土 V_s 的优化模型:

$$V_s / \rho = \alpha + \beta H \quad (1)$$

式中, α 、 β 为拟合参数,其中 α 为无初始固结应力状态对应的海域土 V_s 与 ρ 的比值, β 反映了 H 、 ρ 对海洋原状土的影响程度。

图7给出了基于 ρ 归准的 V_s 与 H 的关系曲线。可以发现,黏性土的 V_s / ρ 随 H 增大而增大(图7(d)、(e)),二者间存在良好的函数关系,公式(1)的拟合效果较好,拟合优度 R^2 均大于0.90,但公式(1)对于砂类土 V_s 量测结果的拟合效果几乎没有改进(图7(a)、(b)、(c))。因此,对该海域砂类土 V_s 的预测可采用多项式函数模型(2),即仅考虑 H 对 V_s 的影响;而对该海域黏性土 V_s 的预测,可采用双变量 H 和 ρ 的优化模型公式(1)。

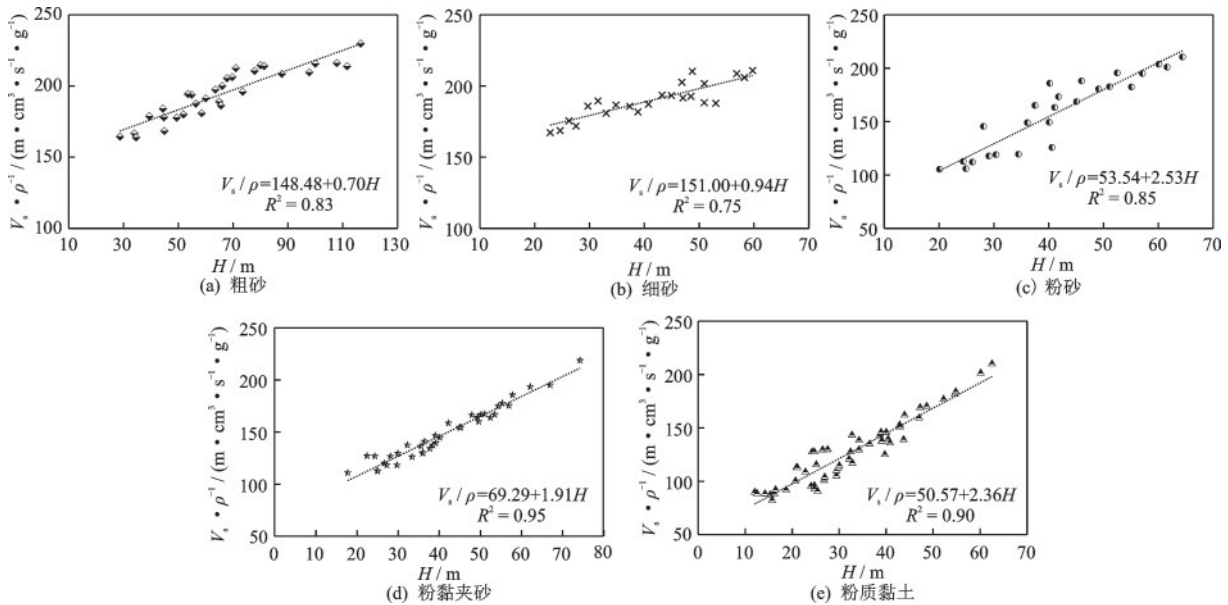


图7 优化模型公式(1)对各类海洋土 V_s 量测结果的拟合度 R^2 的对比

Fig.7 Comparison of the R-square values of optimization model equation (1) for the measured V_s data of various marine soils

4 海洋土 V_s 预测模型的检验

采用多项式函数模型(2)预测该海床砂类土 V_s ,采用优化模型公式(1)预测该海床黏性土 V_s ,图8给出了预测与量测 V_s 值的对比结果。

与该海床砂类土 V_s 的实测值对比,采用模型

(2)预测该海域三类砂类土 V_s 时,粗砂和细砂的 V_s 预测值最大误差约为 10%,粉细砂的 V_s 预测值最大误差小于 20%,且大多数数据点的预测误差小于 10%。与该海床黏性土 V_s 的实测值对比,发现采用公式(1)预测该海域黏性土的 V_s 时,对粉黏夹砂土, V_s 预测值的最大误差约为 10%,对纯粉质黏土, V_s 预测值的最大误差约为 20%,且大多数数据点的预

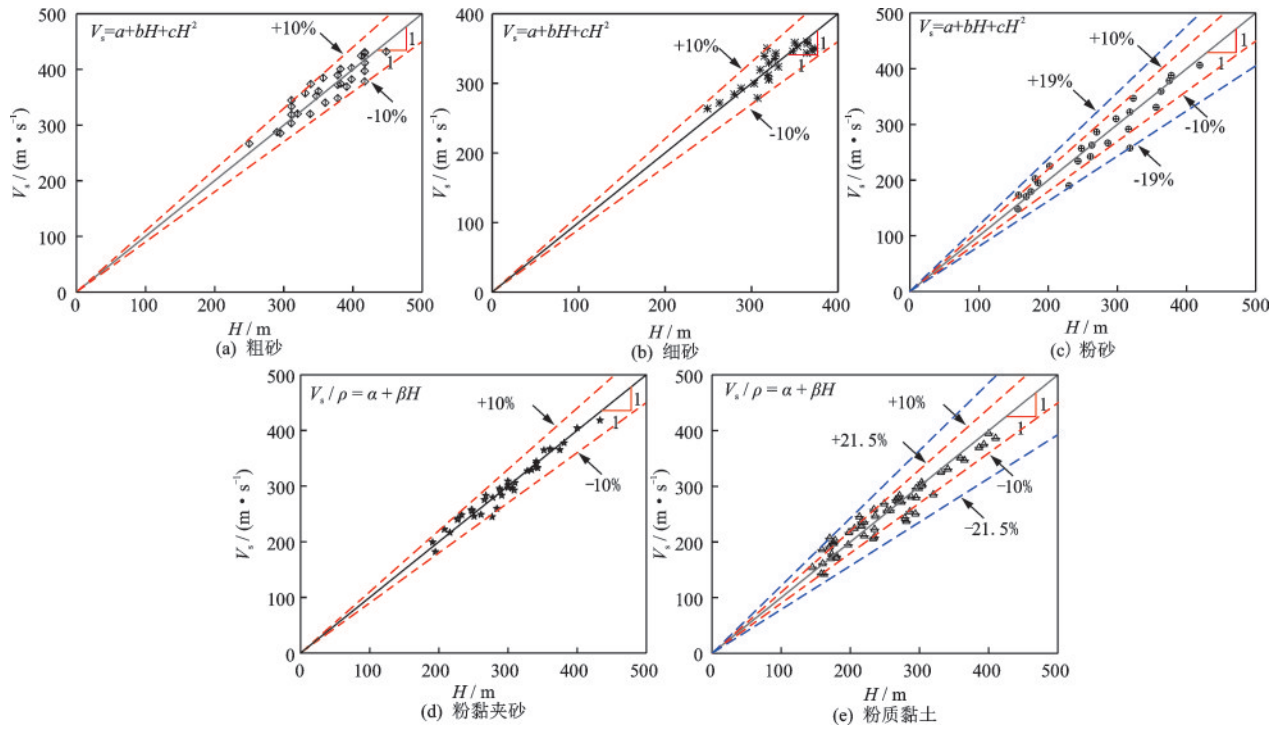


图8 V_s 预测模型拟合误差对比

Fig.8 Comparison of prediction model fitting errors for V_s

测误差小于10%。

因此,采用二次多项式函数模型(2)预测该海床砂类土 V_s ,以及采用优化的双变量模型公式(1)预测该海床黏性土 V_s 具有较高的预测精度,可以满足工程实践的要求。

5 结论

依据位于伶仃洋海域的港珠澳大桥桥隧主体工程 V_s 实测资料,探讨了海域土 V_s 评价方法,主要结论如下:

(1)深度 H 对不同海洋土 V_s 的影响不同。 H 对淤泥和淤泥质土 V_s 的影响无规律,大体上分别为80~110 m/s和110~140 m/s;砂类土和黏性土 V_s 随 H 的增大而显著增大。

(2)现有陆域土 V_s 预测模型对该海域砂类土 V_s 的预测效果较好,且以二次多项式预测模型的预测结果最佳,粗砂和细砂 V_s 的预测误差小于10%,粉土 V_s 的最大预测误差约为20%。

(3)现有陆域土 V_s 预测模型但不适用于该海域黏性土 V_s 的预测;提出了基于密度 ρ 和深度 H 的海洋黏性土 V_s 的双变量预测模型,粉黏夹砂土 V_s 的预测值最大误差小于10%,纯粉质黏土 V_s 的最大预测误差约为20%。

参考文献:

- [1] 陈国兴,岳文泽,阮滨,等. 金塘海峡海床地震反应特征的二维非线性分析[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(11): 1967-1975.
Chen G X, Yue W Z, Ruan B, et al. Two-dimensional non-linear analysis of seismic response characteristics of the seabed in the Jintang Strait[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(11): 1967-1975. (in Chinese)
- [2] Andrus R D, Stokoe K H. Liquefaction resistance based on shear wave velocity[C]//National Center for Earthquake Engineering Research, 1997, 97: 89-128.
- [3] 孔梦云,陈国兴,李小军,等. 以剪切波速与地表峰值加速度为依据的地震液化确定性及其概率判别法[J]. 岩土力学, 2015, 36(5): 1239-1252,1260.
Kong M Y, Chen G X, Li X J, et al. Determination of seismic liquefaction based on shear wave velocity and peak ground acceleration and probabilistic discrimination method[J]. Geotechnical Engineering, 2015, 36(5): 1239-1252,1260. (in Chinese)
- [4] 陈国兴,孙苏豫,吴琪,等. 基于剪切波速的砂砾土地震液化评价新方法[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(10): 1763-1771.
Chen G X, Sun S Y, Wu Q, et al. A new method for

- seismic liquefaction evaluation of gravel land based on shear wave velocity[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 2022, 44(10): 1763-1771. (in Chinese)
- [5] Chen G X, Kong M Y, Khoshnevisan S, et al. Calibration of Vs-based empirical models for assessing soil liquefaction potential using expanded database[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2019, 78(2): 945-957.
- [6] International Code Council (ICC), International Building Code (IBC)[S]. Illinois: Country Club Hills, International Code Council, 2012.
- [7] Building Seismic Safety Council. Nohp recommended seismic provisions for new buildings and other structures [S]. Washington: National Institute of Building Sciences, 2015.
- [8] 陈国兴, 丁杰发, 方怡, 等. 场地类别分类方案研究[J]. *岩土力学*, 2020, 41(11): 3509-3522, 3582.
Chen G X, Ding J F, Fang Y, et al. Site category classification scheme study[J]. *Geotechnical Engineering*, 2020, 41(11): 3509-3522, 3582. (in Chinese)
- [9] 兰景岩, 薄景山, 吕悦军. 剪切波速对设计反应谱的影响研究[J]. *震灾防御技术*, 2007, 2(1): 19-24.
Lan J Y, Bo J S, Lyu Y J. Study of the effect of shear wave speed on the design response spectrum[J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 2007, 2(1): 19-24. (in Chinese)
- [10] Seed H B, Idriss I M, Arango I. Evaluation of liquefaction potential using field performance data[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1983, 109(3): 458-482.
- [11] 陈国兴, 徐建龙, 袁灿勤. 南京城区岩土体剪切波速与土层深度的关系[J]. *南京建筑工程学院学报*, 1998, 19(2): 34-39.
Chen G X, Xu J L, Yuan C Q. The relationship between shear wave velocity and soil depth in geotechnical bodies in Nanjing, China[J]. *Journal of Nanjing Architectural and Civil Engineering Institute*, 1998, 19(2): 34-39. (in Chinese)
- [12] 朱姣, 陈国兴, 许汉刚, 等. 苏州第四纪深厚地层剪切波速空间变化特征及其应用[J]. *岩土工程学报*, 2018, 40(4): 726-735.
Zhu J, Chen G X, Xu H G, et al. Spatial variation characteristics of shear wave velocity structure and its application to quaternary deep sediment layers in Suzhou region[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, 40(4): 726-735. (in Chinese)
- [13] 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.
Liu H S, Zheng T, Qi W H, et al. Relationship between shear wave velocity and depth of conventional soils[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, 32(7): 1142-1149. (in Chinese)
- [14] 战吉艳, 陈国兴, 刘建达. 苏州城区深软场地土剪切波速与土层深度的经验关系[J]. *世界地震工程*, 2009, 25(2): 11-17.
Zhan J Y, Chen G X, Liu J D, et al. Empirical relationship between shear wave velocity and soil depth on deep soft sites in urban areas of Suzhou city[J]. *World Earthquake Engineering*, 2009, 25(2): 11-17. (in Chinese)
- [15] 黄雅虹, 吕悦军, 彭艳菊, 等. 渤海海域黏性土剪切波速与抗剪强度统计关系的初步研究[J]. *中国地震*, 2020, 36(3): 527-538.
Huang Y H, Lyu Y J, Peng Y J, et al. A preliminary study on the statistical relationship between shear wave velocity and shear strength of cohesive soils in the Bohai Sea[J]. *Earthquake Research in China*, 2020, 36(3): 527-538. (in Chinese)
- [16] 荣棉水, 吕悦军, 蒋其峰, 等. 渤海常见土类剪切波速与埋深关系分析[J]. *震灾防御技术*, 2017, 12(2): 288-297.
Rong M S, Lyu Y J, Jiang Q F, et al. Analysis of the relationship between shear wave velocity and burial depth for common soil types in the Bohai Sea[J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 2017, 12(2): 288-297. (in Chinese)
- [17] 裴强, 雷焕珍, 刘红帅. 渤海浅表土层剪切波速与埋深间的关联性[J]. *世界地震工程*, 2013, 29(2): 46-51.
Pei Q, Lei H Z, Liu H S. Correlation between shear wave velocity and burial depth in shallow surface soils of the Bohai Sea[J]. *World Earthquake Engineering*, 2013, 29(2): 46-51. (in Chinese)
- [18] 周杨锐, 董明明, 吴海京, 等. 海洋浅层土质剪切波速与深度的关系分析[J]. *海洋通报*, 2012, 31(1): 63-66, 87.
Zhou Y R, Dong M M, Wu H J, et al. Analysis of the relationship between shear wave velocity and depth of offshore shallow soils[J]. *Marine Science Bulletin*, 2012, 31(1): 63-66, 87. (in Chinese)
- [19] 张丽霞. 广州及邻区地震活动危险性分析[J]. *工程地球物理学报*, 2014, 11(4): 568-574.
Zhang L X. Analysis of the risk of seismic activity in Guangzhou and adjacent areas[J]. *Journal of Engineering Geophysics*, 2014, 11(4): 568-574. (in Chinese)
- [20] 建筑抗震设计规范 GB 50011—2001 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.

- [21] 李存志, 李向新, 姚明波, 等. 昆明盆地剪切波速与地基特性相关分析研究[J]. 昆明冶金高等专科学校学报, 2006, 22(3): 1-5, 10.
Li C Z, Li X X, Yao M B, et al. Analysis of the correlation between shear wave velocity and foundation properties in the Kunming Basin[J]. Journal of Kunming Metallurgical Institute of Higher Education, 2006, 22(3): 1-5, 10. (in Chinese)
- [22] 董菲蕃, 陈国兴, 金丹丹. 福建沿海3个盆地的土层剪切波速与深度的统计关系[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增2): 145-151.
Dong F F, Chen G X, Jin D D. Statistical relation between shear wave velocity and depth of soils in three basins in coastal area of Fujian province[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(Sup2): 145-151. (in Chinese)
- [23] 高玉峰, 刘汉龙. 合肥膨胀土剪切波速的特征分析[J]. 岩土工程学报, 2003, (3): 371-373.
Gao Y F, Liu H L. Study on shear wave velocities in expansive soils of Hefei[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2003, (3): 371-373. (in Chinese)
- [24] 齐鑫, 丁浩. 下辽河平原区剪切波速与土层埋深关系分析[J]. 世界地震工程, 2012, 28(3): 151-156.
Qi X, Ding H. Analysis of relationship between shear wave velocity and depth of soil layers in downstream Li-
aohe River plain[J]. World Earthquake Engineering, 2012, 28(3): 151-156. (in Chinese)
- [25] Marshall Lew. Correlations of seismic velocity with depth[C]//International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics (ICRA GEESD) U.S.A., 1981.
- [26] Wang S Y, Wang H Y. Site-dependent shear-wave velocity equations versus depth in California and Japan[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2016, 88: 8-14.
- [27] 兰景岩, 刘化涤, 吕悦军, 等. 渤海海域典型场地土的动剪切模量比和阻尼比的统计值[J]. 地震研究, 2012, 35(2): 260-267, 296.
Lan J Y, Liu H D, Lyu Y J, et al. Statistical value of dynamic shear modulus ratio and damping ratio of the soils in Bohai Sea[J]. Earthquake Research, 2012, 35(2): 260-267, 296. (in Chinese)
- [28] 王海, 王永志, 汤兆光, 等. 剪切波速-相对密度联合试验与经验公式验证[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(6): 1881-1887.
Wang H, Wang Y Z, Tang Z G, et al. Joint shear wave velocity-relative density test and validation of empirical formulae[J]. Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(6): 1881-1887. (in Chinese)

(本文编辑:周小潭)