

引文: 杨泽亮, 张鹏宇, 黄水祥, 等. 海底管道粗砂和碎石回填层落锚贯入深度计算[J]. 油气储运, 2025, 44(5): 1-9.

YANG Zeliang, ZHANG Pengyu, HUANG Shuixiang, et al. Research on penetration depth calculation of anchors dropped into sand and gravel backfill layers for submarine pipelines[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2025, 44(5): 1-9.

海底管道粗砂和碎石回填层落锚贯入深度计算

杨泽亮¹ 张鹏宇¹ 黄水祥¹ 邵强² 金子航³

1. 中国石油工程项目管理公司天津设计院; 2. 国家管网集团工程技术创新有限公司;
3. 天津大学建筑工程学院·水利工程智能建设与运维全国重点实验室

摘要: 【目的】船舶落锚损伤是造成海底管道第三方破坏的主要因素, 其间接影响海底结构物的运行安全, 因此确定落锚贯入回填层深度, 开发不同回填层落锚贯入深度计算模型, 对海底管道安全运行意义重大。【方法】以霍尔锚为例, 分别采用有限元分析、试验验证、经验公式方法研究了粗砂、碎石回填对落锚贯入深度的影响。先采用 DNV 经验公式、数值模拟方法计算不同质量霍尔锚贯入粗砂、碎石回填层的深度, 再结合落锚原尺寸模型, 开展一系列小比尺落锚物理模型试验, 并对比分析物理模型试验、数值模拟方法、DNV 经验公式的计算结果。【结果】在粗砂工况下, 3 种方法贯入深度的计算结果均吻合良好; 在碎石工况下, 数值模拟与物理模型试验计算结果吻合良好, 但 DNV 经验公式的计算结果与物理模型试验有 45% 的误差。因 DNV 经验公式主要依据圆管落锚试验得出, 为此提出碎石回填层的锚等效前端接触面积经验公式。采用修正后的前端面积公式能够较准确地预测霍尔锚在碎石中的贯入深度, 其计算结果与物理模型试验计算结果高度吻合。同时根据上述计算结果拟合了粗砂、碎石回填层不同质量霍尔锚最大贯入深度的回归方程。【结论】研究成果可为海底管道防护工程的设计与安全评估提供依据。(图 8, 表 4, 参 22)

关键词: 霍尔锚; 贯入深度; 碎石; 冲击速度

中图分类号: TE88

文献标识码: A

文章编号: 1000-8241(2025)05-0001-09

DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2024.00.000

Research on penetration depth calculation of anchors dropped into sand and gravel backfill layers for submarine pipelines

YANG Zeliang¹, ZHANG Pengyu¹, HUANG Shuixiang¹, SHAO Qiang², JIN Zihang³

1. Tianjin Design Institute of CNPC Project Management Company; 2. PipeChina Engineering Technology Innovation Co., Ltd.;
3. School of Civil Engineering, Tianjin University//State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Intelligent Construction and Operation

Abstract: 【Objective】 Damages caused by dropping ship anchors have become a major factor contributing to third-party damages to submarine pipelines, indirectly affecting the operational safety of underwater structures. Therefore, determination of the penetration depth of dropped anchors into backfill layers using calculation models developed for anchor penetration into various backfill layers is of great significance. 【Methods】 The influence of backfilling with coarse sand and gravel on penetration depths, focusing on Hall anchors as a case study, was studied using finite element analysis, experimental verification, and empirical formula methods. First, the DNV empirical formulas and numerical simulation methods were applied to calculate the penetration depths of Hall anchors with varying masses into coarse sand and gravel backfill layers. Next, a series of down-scaled physical model experiments for anchor dropping were conducted under the same conditions as those used for analyses with the DNV empirical formulas and numerical simulations based on a full-scale model. The results from the physical model experiments, numerical simulations, and calculations based on the DNV empirical formula were compared and analyzed. 【Results】 Under coarse sand conditions, the penetration depth results generated by the three methods were in good agreement. In gravel conditions, the results from numerical simulations and physical model experiments were also in good agreement; however, there was a 45% deviation between the DNV empirical formula and physical model experimental results. Since the DNV empirical formula is primarily based on circular tube dropping experiments, an empirical formula for equivalent front-end contact areas of anchors penetrating

into gravel backfill layers was proposed. This formula, incorporating a modified front area factor, can more accurately predict the penetration depth of Hall anchors in gravel, with its calculation results closely aligning to those obtained from physical model experiments. Additionally, regression equations for maximum penetration depths of Hall anchors with different masses in coarse sand and gravel backfill layers were developed through fitting, based on the above calculation results. **[Conclusion]** The research results provide a basis for the design and safety assessment of protection structures for submarine pipelines. (8 Figures, 4 Tables, 22 References)

Key words: Hall anchor, penetration depth, gravel, impact velocity

浅近海海底管道具有通航作业繁忙、第三方活动频繁、管道安全风险大等特点^[1],虽然海底管道设有安全保护范围,禁止船舶在保护区内进行抛锚、拖锚作业,但在实际中由于人为操作失误、恶劣天气船舶紧急抛锚、锚链脱落等不可控因素,很容易对海底管道造成撞击损坏^[2]。由于海底管道埋设保护成本较高,确定管道的最佳埋深,使得管道既能免受锚击损坏又能节约工程成本已成为一个重要课题。

关于落物贯入回填层深度的研究,目前主要为挪威船级社的 DNV 经验公式算法,但其仅适用于落管、集装箱等形状坠物贯入碎石保护层深度的计算。行业内至今没有适用于船锚贯入碎石的统一计算模型。为此,诸多学者对落锚贯入海底管道回填层展开研究。在理论分析方面,梁鹏等^[3]研究了不同经验公式计算结果的差异。李学东等^[4]利用 Young 公式建立了船锚贯入深度的计算模型。在物理模型试验方面,王慧等^[5-7]通过比例尺试验拟合了船锚贯入黏性土、无黏性土的深度计算公式。张萌萌等^[8]通过建立缩尺抛锚冲击试验,提出了抛锚冲击荷载作用下管道最小埋深的计算方法。An 等^[9]通过一系列落锚试验,研究了霍尔锚在砂土中的贯入机理,揭示了加速度对砂土中霍尔锚水平位移的影响。Zhang 等^[10]采用实验测量方法,对整个锚固过程的力学行为进行了全面研究。羊均雯等^[11]针对霍尔锚在静水中的垂直落锚情况,通过理论分析和物理模型试验研究了贯入深度的影响因素。王懿等^[12]基于大比尺落锚模型试验研究了埋设管道受力及凹陷的变形规律。Zheng 等^[13]开展了物理模型试验、理论分析及数值模拟,提出了基于冲击和阻力机理的分析模型。在数值模拟方面,王懿等^[14-15]利用 CEL(Coupled Eulerian-Lagrangian)方法研究了船舶落锚贯入深度与落锚速度、土体强度参数之间的关系。庄元等^[16]运用数学建模方法对锚在水中下落的运动过程进行描述,并提出了计算抛锚贯穿深度的简单计算方法。闫澍旺等^[17]对比了有限元与 DNV 经验公式

计算冲击荷载作用下岩土材料能量耗散情况,发现其一致性良好。臧志鹏等^[18]基于有限元模拟了落锚、海底管道、海床土体、块石层及混凝土排垫系统,研究了管道应变极值和管体凹陷变形的影响因素。Keerthi 等^[19]采用数值计算模型研究了鱼雷锚的自由落体水动力效应。

综上,现有关于落锚贯入土体的研究,回填材料大多为黏土和砂土,碎石回填材料下的落锚研究较少。DNV 经验公式因基于圆管贯入试验,其对于落锚贯入碎石层深度计算的合理性和适用性有待进一步研究。霍尔锚以其抓住性良好、收存方便等特点受到大中型船舶主锚的广泛采用,故以霍尔锚为例,采用 DNV 经验公式、物理模型试验、有限元数值模拟相结合的方式探究其贯入粗砂、碎石回填层深度。基于 DNV 经验公式推导了霍尔锚贯入碎石回填层前端接触面积回归方程,提出了不同质量霍尔锚在粗砂与碎石层贯入深度的计算公式,以期为海底管道回填层的工程设计提供技术支持。

1 落锚贯入深度的物理特征及经验公式

1.1 物理特征

为保护海底管道不受落物冲击破坏,通常在其上部覆盖一层回填层,或通过自然回淤在管道上方形成一层由黏土或砂土组成的保护层。这些保护层由于自身的黏弹性,在发生应力-应变的过程中,会部分消耗落物的冲击能量,从而起到保护海底管道的作用。落锚冲击岩土具有几何非线性、材料非线性、接触非线性等特点,因此通过数学模型进行解析十分困难。

1.2 贯入深度 DNV 经验公式

对于锚在水中的自由下落运动,假设水体静止,当不考虑锚链影响时,锚落入水中的触底冲击速度 v 的表达式^[22]为:

$$v = \left[\left(2gh_0 - \frac{2Ug(\rho_s - \rho_w)}{C_b \rho_w A_F} \right) \exp \left(\frac{-C_b \rho_w A_F z}{U \rho_s} \right) + \frac{2Ug(\rho_s - \rho_w)^{\frac{1}{2}}}{C_b \rho_w A_F} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式中: h_0 为锚距水面距离, m; g 为重力加速度, m/s^2 ; U 为锚的体积, m^3 ; ρ_s 为锚的密度, kg/m^3 ; ρ_w 为海水的密度, kg/m^3 ; C_b 为阻力系数, 无量纲; A_F 为锚的前端面积, m^2 ; z 为落锚入水的深度, m。

与空气中的坠物撞击问题不同, 坠物在撞击海底管道时, 附加水的质量对碰撞结果影响较大。目前常使用等效密度法考虑附加水质量的影响, 等效密度的计算公式为:

$$\rho_e = \rho_a \left(1 + \frac{\rho_w}{\rho_a} C_d \right) \quad (2)$$

式中: ρ_e 为坠物的等效密度, kg/m^3 ; ρ_a 为坠物密度, kg/m^3 ; ρ_w 为海水密度, 取 $1\,025\,kg/m^3$; C_d 为附加质量系数。

DNVGL-RP-F114《海底管道管土相互作用》基于试验数据推导出了坠落物体贯穿回填保护层的能量吸收计算方法, 其表达式为:

$$E_p = 0.5 \gamma D N_r A Z + 0.5 \gamma Z^2 N_q A \quad (3)$$

式中: E_p 为回填保护层的吸收能量, kJ; γ 为回填材料单位有效质量, 块石取 $11\,kN/m$; D 为坠落物的直径, m; Z 为贯入深度, m; N_q 、 N_r 为承载力系数; A 为坠落圆管前端接触面积, m^2 。

由于 DNV 经验公式基于圆管贯入试验, 圆管与岩土的前端接触面积是恒定值, 但锚是复杂几何结构, 其与海底管道回填层的前端接触面积是动态变化的非恒定值, 因此, 需要对落锚前端接触面积的取值做进一步深入研究。

2 物理模型试验

2.1 相似关系

模型试验比尺 λ_L 为原型尺寸 L_p 与模型尺寸 L_m 之比, 即 $\lambda_L = L_p/L_m$ 。在缩尺试验中, 目前行业内落锚试验比例尺普遍采用 $5 \sim 20$, 模型比尺过大会导致精度损失。综合考虑模型尺寸、土体强度及抛锚时边界效应对模型贯入深度的影响, 选用小比尺 ($\lambda_L = 6$) 进行试验。为保证模型锚与原型锚的能量相似, 模型锚的面积、重力、长度、密度、时间、速度、抛锚深度、土强度的相似比尺分别为 λ_L^2 、 λ_L^3 、 λ_L 、 1 、 $\sqrt{\lambda_L}$ 、 $\sqrt{\lambda_L}$ 、 λ_L 、 λ_L 。

2.2 土样制备

砂土选用干燥硅质砂, 平均粒径为 $0.075 \sim 2\,mm$ 。水下饱和砂土采用水中落砂法制备, 先将液体置于土槽内, 然后加入土颗粒获得饱和和中密实状态的砂土。考虑到粗砂粒径很小, 对落锚冲击深度影响可忽略不计, 故不再进一步采取缩尺尺寸。

对碎石尺寸按照几何比尺 $1:6$ 进行缩尺, 选用级配 $d_{50}(6.5 \sim 7.5\,mm)$ 的碎石进行回填, 模拟直径约 $40\,mm$ 原型锚冲击碎石工况。碎石回填后使碎石在水中完全浸没, 且液面高度与回填高度保持一致。

2.3 模型锚

吨位为 $5 \times 10^4\,t$ 、 $10 \times 10^4\,t$ 、 $15 \times 10^4\,t$ 、 $30 \times 10^4\,t$ 及 $45 \times 10^4\,t$ 的船舶所用霍尔锚质量分别为 $8.2\,t$ 、 $12.4\,t$ 、 $15.4\,t$ 、 $22.0\,t$ 、 $27.5\,t$ 。根据 GB/T 546—2016《霍尔锚》, 以比例尺 $1:6$ 制作模型锚(编号分别为 M1~M5), 可得到各模型锚尺寸及与原型锚对应关系(表 1), 且模型锚材质、工艺均与原型锚相同。

表 1 5 种模型锚与原型锚对应关系表

Table 1 Correspondence between 5 modeled anchors and full-scale anchors

模型锚编号	模型锚质量/kg	原型锚质量/t	模拟船舶吨位/t
M1	40	8.2	5×10^4
M2	60	12.4	10×10^4
M3	75	15.4	15×10^4
M4	100	22.0	30×10^4
M5	125	27.5	45×10^4

2.4 试验设备及方法

坠锚物理模型试验在试验土槽及落锚装置中进行, 将卸扣与模型锚连接, 用电磁铁将卸扣连接在起重系统挂钩上, 保持各次试验中锚爪位于锚柄相同侧, 并使模型锚处于静止状态。在试验中, 首先根据式(1)计算原型锚坠落相应不同水深的冲击速度, 模型锚冲击速度由原型锚速度按照 2.1 节比例尺关系进行折算。在锚柄连接卸扣一端安装加速度传感器, 然后由起吊设备将模型试验锚提升至预定高度(对应折算的模型锚冲击速度), 让模型锚自由下落, 直至贯入土体停止运动, 利用关节臂坐标测量机测量回填土体的凹陷, 并按比例尺关系折算成原型锚贯入深度。模型锚锚柄底端安装加速度传感器, 并通过数据线和数据采集仪

相连,测得模型锚在下落过程中的实时下落加速度,通过对加速度积分即可得到其速度与下落高度的变化情况。

在实际抛锚的过程中,还会有锚链的牵引、锚链筒的摩擦、锚机等因素的影响,其运动过程十分复杂,造成冲击岩土角度有随机性。为保持计算结果的一致性,在计算中假设霍尔锚冲击回填层姿态垂直贯入。

3 有限元数值模拟

采用有限元软件 ANSYS 对落锚过程开展数值分析,并将分析结果与 DNV 经验公式、物理模型试验结果进行对比,以验证采用有限元数值模拟方法分析此类问题的可行性。

3.1 模型建立

采用有限元软件 ANSYS 建立锚-海床-管道有限元模型,对落锚过程开展数值分析。海床为长 12 000 mm、宽 6 000 mm、高 6 000 mm 的长方体。回填层是一种典型的非线性材料,在落锚冲击过程中其载荷是动态变化的,考虑土壤在落锚冲击下的弹塑性变形情况,数值模拟计算采用 DP(Drucker-Prager)模型模拟岩石土壤(表 2)。DP 模型在模拟土体受落物冲击作用下的弹塑性变形方面有较好效果,并且在大变形的情况下,其计算仍然比较稳定。根据邢心魁等^[20-21]对不同配比、密实度的碎石抗剪强度(内摩擦角)的测试可知,碎石内摩擦角在 40°~49°之间时,水下环境对其影响较小;任宇晓^[22]根据 DNV 经验公式计算管道贯入碎石层深度时推荐的地基承载力系数 N_q 、 N_r 取值分别为 99、137,经反算碎石内摩擦角为 43°,因此该数值模拟算例中碎石的內摩擦角取值为 43°。模拟锚冲击岩土时需要考虑落锚附加水质量,在计算中使用等效密度的方法考虑附加水质量的影响。对于霍尔锚,选取附加水质量系数为 0.7,根据式(2)求得等效密度为 8 567 kg/m³。建模过程中,将霍尔锚视为刚性体,可用 *MAT_RIGID

材料定义,其泊松比为 0.3,弹性模量为 2.1×10^{11} N/m²。海底管道钢材等级 X65,其杨氏模量为 2.1×10^{11} N/m²,泊松比为 0.3,最小屈服强度为 4.48×10^8 Pa。

3.2 边界条件和网格划分

海床下表面固定垂向位移,对霍尔锚施加垂直向下初速度。除上表面和下表面,其他面定义无反射边界条件以模拟无限远场海床。霍尔锚与岩土之间定义为侵蚀面接触,海床与回填层、管道与回填层之间均定义为自动面面接触。

海床采用六面体映射网格划分,并对碰撞热点区域进行网格加密。由于锚形状不规则,故采用四面体网格划分方式。网格精度对动态计算影响较大,因此对土体模型进行了不同网格精度测试发现,在网格尺寸小于 80 mm、单元数量大于 47.4×10^4 的精度下霍尔锚贯入深度基本趋于一致。考虑计算精度与计算效率,选取尺寸为 80 mm、单元数为 47.4×10^4 的网格进行后续数值模拟分析(图 1)。

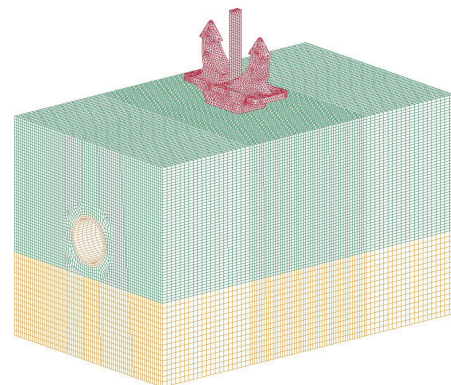


图 1 锚-海床-管道有限元模型网格划分图
Fig. 1 Meshing of anchor-seabed-pipeline finite element model

4 分析与讨论

4.1 试验工况及结果对比

霍尔锚贯入试验共进行 24 组工况,其中前 9 组(H1~H9)选取模型锚 M1~M3 进行贯入粗砂试验,15 组(H10~H24)选取模型锚 M1~M5 进行贯入碎石试验。为包含浅近海海底管道所处的不同水深,试验模拟的水深设置为 10 m、20 m、30 m。采用上述 DNV 经验公式、物理模型试验、数值模拟方法计算可得到霍尔锚贯入试验在各工况下的贯入深度(表 3,表中物理模型试验计算结果为将模型锚数据折算为原型锚的结果)及其误差分析结果(图 2)。可见,霍尔锚贯入粗砂工况

表 2 DP 模型模拟的岩石土壤材料参数表

Table 2 Parameters of rock and soil materials for simulations based on DP model

岩石土壤类型	土壤密度/ (kg·m ⁻³)	剪切模量/ (N·m ⁻²)	泊松比	内聚力/ KPa	内摩擦角/ (°)
粗砂	1 700	10×10^6	0.2	2 000	35
碎石	1 800	80×10^6	0.2	500	43

表 3 霍尔锚贯入试验 24 组工况下采用数值模拟方法、DNV 经验公式及物理模型试验计算得到的贯入深度表
 Table 3 Penetration depths of Hall anchors based on numerical simulations, DNV empirical formula calculations, and physical model experiments under 24 experimental conditions

工况	岩石土壤类型	模型锚编号	模拟水深/m	冲击速度/ ($m \cdot s^{-1}$)	贯入深度/m		
					DNV 经验公式	物理模型试验	数值模拟方法
H1	粗砂	M1	10	8.827 2	0.433 4	0.462 6	0.480
H2	粗砂	M1	20	7.902 1	0.363 0	0.356 4	0.430
H3	粗砂	M1	30	7.920 4	0.364 8	0.318 0	0.430
H4	粗砂	M2	10	9.609 8	0.550 0	0.510 0	0.570
H5	粗砂	M2	20	8.669 2	0.470 0	0.434 4	0.540
H6	粗砂	M2	30	8.464 7	0.453 0	0.470 4	0.530
H7	粗砂	M3	10	9.948 6	0.614 5	0.630 0	0.630
H8	粗砂	M3	20	8.966 1	0.525 4	0.533 4	0.590
H9	粗砂	M3	30	8.808 9	0.511 0	0.525 6	0.560
H10	碎石	M1	10	8.834 6	0.135 0	0.283 2	0.300
H11	碎石	M1	20	7.924 8	0.110 0	0.235 8	0.290
H12	碎石	M1	30	7.924 3	0.110 0	0.207 0	0.290
H13	碎石	M2	10	9.563 5	0.178 2	0.382 8	0.370
H14	碎石	M2	20	8.614 6	0.146 6	0.337 8	0.350
H15	碎石	M2	30	8.507 6	0.143 4	0.336 0	0.303
H16	碎石	M3	10	9.908 7	0.204 0	0.472 2	0.420
H17	碎石	M3	20	8.960 5	0.170 0	0.362 4	0.410
H18	碎石	M3	30	8.854 7	0.166 0	0.367 2	0.380
H19	碎石	M4	10	10.622 5	0.255 0	0.534 0	0.505
H20	碎石	M4	20	9.563 3	0.211 0	0.475 2	0.467
H21	碎石	M4	30	9.237 0	0.198 0	0.451 8	0.440
H22	碎石	M5	10	11.005 8	0.274 6	0.638 4	0.520
H23	碎石	M5	20	9.980 9	0.214 5	0.533 4	0.500
H24	碎石	M5	30	9.660 5	0.203 1	0.531 6	0.450

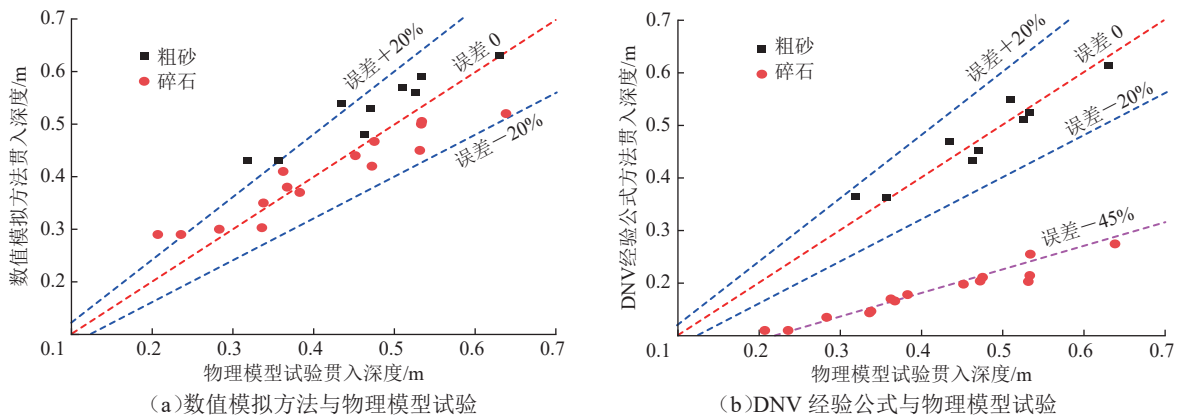


图 2 霍尔锚贯入试验 24 组工况下采用数值模拟方法、DNV 经验公式与物理模型试验计算得到的贯入深度误差分析图
 Fig. 2 Deviation analysis for penetration depths of Hall anchors based on numerical simulations, DNV empirical formula calculations, and physical model experiments under 24 experimental conditions

的深度大于碎石工况, 且冲击速度越大, 贯入深度越大。粗砂工况的 DNV 经验公式、数值模拟方法与物理模型试验结果基本一致, 最大误差在 20% 左右; 碎石工

况的数值模拟方法与物理模型试验结果基本一致, 最大误差也在 20% 左右, 但采用投影算法($A=BL$, 其中 B 、 L 分别为锚冠的宽度、长度)作为式(3)中坠落圆管前端

接触面积的计算结果过小,导致 DNV 经验公式计算的贯入深度与物理模型试验误差约 45%,其原因为:实际工况霍尔锚的锚体无法完全贯入碎石回填层,使锚与碎石回填层的实际前端接触面积较小,但采用投影算法的前端接触面积计算结果过大,进而使 DNV 经验公式计算的贯入深度结果较物理模型试验结果偏小。

4.2 DNV 经验公式前端接触面积优化

DNVGL-RP-F114 中贯入碎石计算公式(式(3))是针对钢管贯入推导出的经验公式,钢管前端接触面积为恒定值,但霍尔锚及其他锚形状为非线性结构物,在冲击回填层的过程中由于其接触的高度非线性,随着冲击深入,前端接触面积是一个逐渐增大的过程,而非一个恒定值。因此,采用 DNV 经验公式计算霍尔锚贯入碎石层深度会导致较大误差。

影响适用于锚贯入碎石前端接触面积的主要因素包括锚质量、锚底部形状、面积等。综合上述因素,依据模型试验结果,提出两个前端接触面积经验公式:①经验公式 1 ($A = 0.4 BL$) 依托锚尺寸;②经验公式 2 ($A = 0.057 M + 0.6$, 其中 M 为锚质量) 依托锚质量。将上述两个经验公式与锚贯入碎石物理模型试验、数值模拟方法结果利用 DNV 经验公式反推得到的前端接触面积进行对比(图 3),发现两经验公式结果与反推结果均高度吻合,故可采用公式 1 计算结果做为 DNV 经验公式前端接触面积进行误差分析,15 个碎石工况中仅 H12 工况较物理模型试验结果误差略高于 10%,其余 14 个工况误差均在 10% 以内(图 4)。

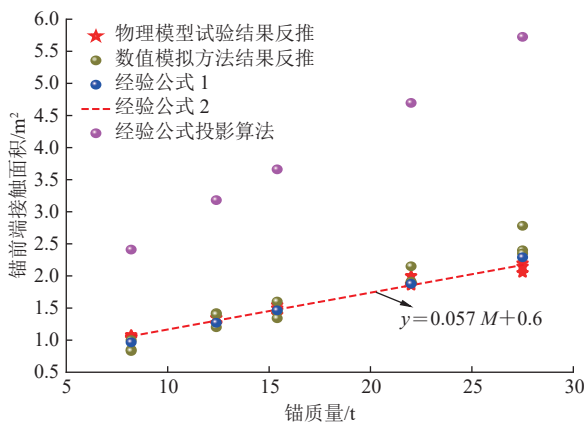


图 3 前端接触面积经验公式与锚贯入碎石物理模型试验、数值模拟方法结果利用 DNV 经验公式反推得到的前端接触面积对比图

Fig. 3 Comparison of front-end contact areas from front-end contact area empirical formula calculations and those inferred reversely using the DNV empirical formula and results from physical model experiments, and numerical simulations for anchor penetration into gravel

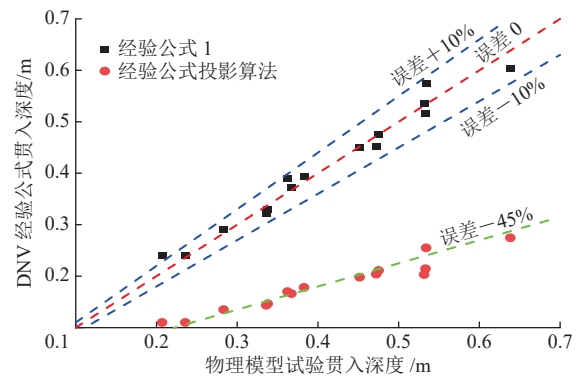


图 4 霍尔锚贯入碎石试验 15 组工况下采用 DNV 经验公式与物理模型试验计算得到的贯入深度误差分析图

Fig. 4 Deviation analysis for penetration depths of Hall anchors based on DNV empirical formula calculations and physical model experiments under 15 experimental conditions

为探究优化后的经验公式计算不同落锚冲击速度的准确性与适用性,在表 3 中碎石工况 H13~H18 的基础上增加 6 组与水深无关的低速工况 S1~S6(表 4),采用上述 3 种 DNV 经验公式、物理模型试验、数值模拟方法计算可得到霍尔锚 M2、M3 在不同冲击速度下的贯入深度(图 5、图 6)。可见,在水深分别为 10 m、20 m、30 m 工况下,霍尔锚 M2、M3 在修正前端接触面积后与物理模型试验、数值模拟方法结果吻合较好,但对于冲击速度小的工况(S1~S6),采用优化后的前端接触面积 DNV 经验公式计算结果均小于物理模型试验、数值模拟方法计算结果,其原因是:质量相同的锚,不同冲击速度造成与岩土的前端接触面积不同,冲击速度小导致锚前端与岩土接触面积小,进而造成计算的贯入深度较小。因此,采用有限元算法计算不同冲击速度下碎石层贯入深度具有更广泛的适用性与较高的准确性。

表 4 霍尔锚贯入碎石增加低速工况参数表

Table 4 Penetration depths generated by 3 methods under conditions of Hall anchors penetrating into gravel

工况	模型锚编号	模拟水深/m	冲击速度/(m·s ⁻¹)
H13	M2	10	9.563 5
H14	M2	20	8.614 6
H15	M2	30	8.507 6
S1	M2	-	6.865 7
S2	M2	-	5.921 2
S3	M2	-	4.783 1
H16	M3	10	9.908 7
H17	M3	20	8.960 5
H18	M3	30	8.854 7
S4	M3	-	6.893 8
S5	M3	-	5.965 5
S6	M3	-	4.829 9

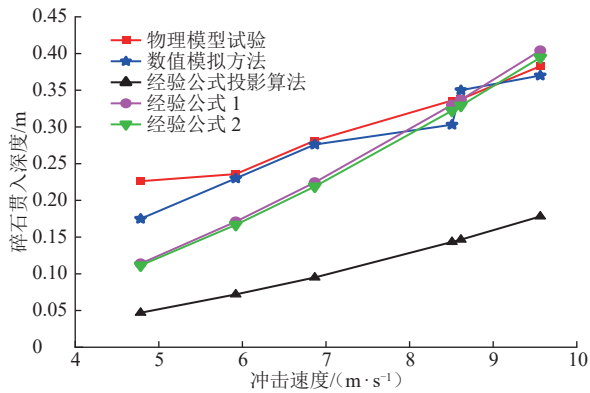


图5 采用 DNV 经验公式、物理模型试验、数值模拟方法计算得到的霍尔锚 M2 在不同冲击速度下的碎石贯入深度图
Fig. 5 Penetration depths of Hall anchor M2 into gravel at different impact velocities based on calculations using DNV empirical formulas, physical model experiments, and numerical simulations

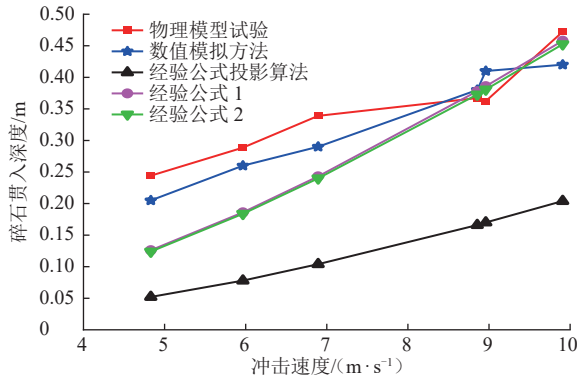


图6 采用 DNV 经验公式、物理模型试验、数值模拟方法计算得到的霍尔锚 M3 在不同冲击速度下的碎石贯入深度图
Fig. 6 Penetration depths of Hall anchor M3 into gravel at different impact velocities based on calculations using DNV empirical formulas, physical model experiments, and numerical simulations

4.3 霍尔锚粗砂贯入深度计算

取表 3 中工况 H3、H6、H9 的物理模型试验、数值模拟方法贯入深度数据进行拟合, 即可得到霍尔锚粗砂贯入深度与锚质量的拟合曲线(图 7)。可见, 拟

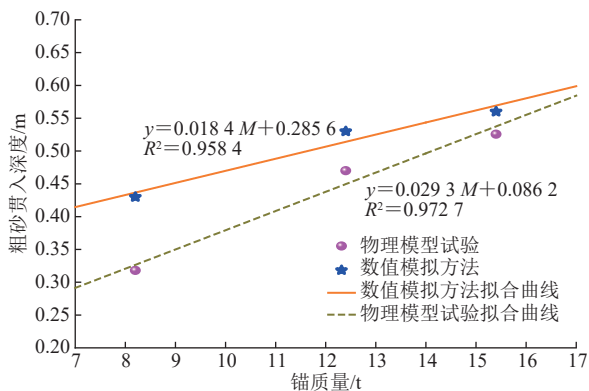


图7 霍尔锚粗砂贯入深度与锚质量的拟合曲线
Fig. 7 Curve fitting of penetration depths of Hall anchors into coarse sand and anchor masses

合曲线均为一元一次线性方程, 其中, 物理模型试验得到的贯入深度回归方程为 $Z_1 = 0.0293 M + 0.0862$, 拟合精度 $R^2=0.9727$; 数值模拟方法得到的贯入深度回归方程为 $Z_2 = 0.0184 M + 0.2856$, 拟合精度 $R^2=0.9584$, 二者的拟合精度均较高, 因此, 该回归方程可以用来在工程领域快速估算霍尔锚贯入粗砂深度。

4.4 霍尔锚碎石贯入深度计算

取表 3 中工况 H12、H15、H18、H21、H24 的物理模型试验、数值模拟方法求得的贯入深度数据进行拟合, 即可得到霍尔锚碎石贯入深度与锚质量的拟合曲线(图 8)。可见, 拟合曲线均为一元二次方程, 其中物理模型试验得到的贯入深度回归方程 $Z_3 = -0.0004 M^2 + 0.0308 M - 0.0053$, 拟合精度 $R^2=0.9821$; 数值模拟方法得到的贯入深度回归方程 $Z_4 = -0.0001 M^2 + 0.0145 M + 0.1679$, 拟合精度 $R^2=0.9581$ 。在 15.4 t 锚重下, 物理模型试验和数值模拟方法计算结果较接近; 当锚重小于 15.4 t 时, 数值模拟方法计算结果大于物理模型试验; 当锚重大于 15.4 t 时, 物理模型试验计算结果大于数值模拟方法。

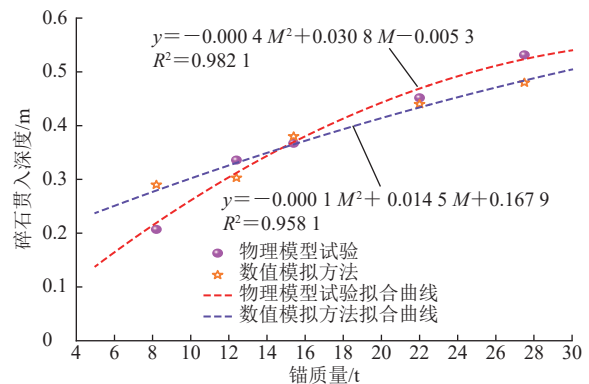


图8 霍尔锚碎石贯入深度与锚质量的拟合曲线
Fig. 8 Curve fitting of penetration depths of Hall anchors into gravel and anchor masses

5 结论

针对浅近海海底管道特点, 以霍尔锚为例分别采用 DNV 经验公式、物理模型试验、有限元数值模拟方法研究了粗砂、碎石回填层对落锚贯入深度的影响, 重点研究了 DNV 经验公式对落锚贯入碎石层深度计算的合理性和适用性, 得到以下结论:

1) 采用投影算法为计算前端接触面积的 DNV 经验公式只适用于粗砂回填工况, 不适用于碎石回填工况。以往针对落锚贯入碎石回填层深度的研究缺少

DNV 经验公式适用性相关内容,为此,提出了分别基于锚尺寸、锚质量的霍尔锚贯入碎石前端接触面积经验公式。

2)建立了落锚贯入回填层数值模型并将结果与物理模型试验进行对比,验证了采用显示动力学数值模拟方法解决落锚冲击岩土高度非线性问题的可靠性。

3)提出了不同质量霍尔锚粗砂、碎石的贯入深度回归方程,可以为海底管道回填层工程设计提供技术支持,但锚贯入碎石回填层前端接触面积除与自身几何形状及质量有关外,还会受到冲击速度影响,下一步应将冲击速度纳入锚前端接触面积研究内容。

参考文献:

- [1] AULIA R, TAN H, SRIRAMULA S. Dynamic reliability model for subsea pipeline risk assessment due to third-party interference[J]. *Journal of Pipeline Science and Engineering*, 2021, 1(3): 277-289. DOI: [10.1016/j.jpse.2021.09.006](https://doi.org/10.1016/j.jpse.2021.09.006).
- [2] 任涛, 郑吉霖, 曾威, 刘强. 冲击载荷下含腐蚀缺陷的海底管道损伤分析[J]. *石油机械*, 2024, 52(9): 67-73. DOI: [10.16082/j.cnki.issn.1001-4578.2024.09.009](https://doi.org/10.16082/j.cnki.issn.1001-4578.2024.09.009).
- REN T, ZHENG J L, ZENG W, LIU Q. Damage analysis of submarine pipelines with corrosion defects under impact load[J]. *China Petroleum Machinery*, 2024, 52(9): 67-73.
- [3] 梁鹏, 戴国华, 苑健康, 潘悦然, 万宇飞, 高书鹏. 复杂地质条件下船舶落锚贯入深度影响分析[J]. *浙江海洋大学学报(自然科学版)*, 2021, 40(4): 356-362. DOI: [10.3969/j.issn.1008-830X.2021.04.010](https://doi.org/10.3969/j.issn.1008-830X.2021.04.010).
- LIANG P, DAI G H, YUAN J K, PAN Y R, WAN Y F, GAO S P. Analysis of the penetration depth of anchor under complex geological conditions[J]. *Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science)*, 2021, 40(4): 356-362.
- [4] 李学东, 李亚斌, 陈伟. 船锚触底贯穿量计算方法[J]. *中国航海*, 2016, 39(1): 85-87, 128. DOI: [10.3969/j.issn.1000-4653.2016.01.019](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-4653.2016.01.019).
- LI X D, LI Y B, CHEN W. Penetrating depth of anchor into seabed[J]. *Navigation of China*, 2016, 39(1): 85-87, 128.
- [5] 王慧, 张可成, 王忠涛, 张宇, 王洪波. 霍尔锚在粉细砂中抛锚深度模型试验[J]. *海洋学报(中文版)*, 2020, 42(11): 123-130. DOI: [10.3969/j.issn.0253-4193.2020.11.012](https://doi.org/10.3969/j.issn.0253-4193.2020.11.012).
- WANG H, ZHANG K C, WANG Z T, ZHANG Y, WANG H B. Model tests on penetration depth of hall anchor in silty sand[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2020, 42(11): 123-130.
- [6] 刘润, 汪嘉钰, 别社安. 船舶抛锚过程中落锚贯入深度研究[J]. *天津大学学报*, 2020, 53(5): 508-516. DOI: [10.11784/tdxbz201905051](https://doi.org/10.11784/tdxbz201905051).
- LIU R, WANG J Y, BIE S A. Study of the penetration depth of an anchor in the dropping anchor process[J]. *Journal of Tianjin University*, 2020, 53(5): 508-516.
- [7] 韩聪聪, 陈学俭, 刘君. 霍尔锚抛锚深度模型试验研究[J]. *海洋工程*, 2018, 36(5): 90-98. DOI: [10.16483/j.issn.1005-9865.2018.05.011](https://doi.org/10.16483/j.issn.1005-9865.2018.05.011).
- HAN C C, CHEN X J, LIU J. Model tests on penetration depth of hall anchor[J]. *The Ocean Engineering*, 2018, 36(5): 90-98.
- [8] 张萌萌, 李林安, 郭志明, 雷震名, 张翔, 闫澍旺. 基于跨航道抛锚作业的海底管道埋深研究[J]. *海洋通报*, 2016, 35(6): 694-701. DOI: [10.11840/j.issn.1001-6392.2016.06.012](https://doi.org/10.11840/j.issn.1001-6392.2016.06.012).
- ZHANG M M, LI L A, GUO Z M, LEI Z M, ZHANG X, YAN S W. Research of the embedment depth of the subsea pipelines based on the anchoring operation in shipping lanes[J]. *Marine Science Bulletin*, 2016, 35(6): 694-701.
- [9] AN X Y, WANG F, LIANG C, LIU R. Centrifuge modeling of dynamically penetrating anchors in sand and clay[J]. *Geomechanics and Engineering*, 2022, 30(6): 539-549. DOI: [10.12989/gae.2022.30.6.539](https://doi.org/10.12989/gae.2022.30.6.539).
- [10] ZHANG L, LI X B, WANG J C, ZHUO Z C, YUE L, WANG W K, et al. Mechanical response of dropping a Hall anchor and its penetration depth in riverbed silt[J]. *Ocean Engineering*, 2023, 281: 114845. DOI: [10.1016/j.oceaneng.2023.114845](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114845).
- [11] 羊约雯, 王闻恺, 杨少鹏, 张民曦, 喻国良. 霍尔锚落锚贯入力峰值及相应深度的分析[J]. *船海工程*, 2024, 53(3): 101-106. DOI: [10.3963/j.issn.1671-7953.2024.03.019](https://doi.org/10.3963/j.issn.1671-7953.2024.03.019).
- YANG D W, WANG W K, YANG S P, ZHANG M X, YU G L. Analysis of the maximum penetration force and corresponding depth of the hall anchor dropping into seabed[J]. *Ship & Ocean Engineering*, 2024, 53(3): 101-106.
- [12] 王懿, 黄俊, 李丽伟, 邓卓远, 顾雨晨. 航道区碎石层对霍尔锚落锚条件下海底管道防护效果研究[J]. *海洋工程*, 2024, 42(3): 179-189. DOI: [10.16483/j.issn.1005-9865.2024.03.016](https://doi.org/10.16483/j.issn.1005-9865.2024.03.016).
- WANG Y, HUANG J, LI L W, DENG Z Y, GU Y C. Study on the protection effect of the gravel layer in the channel area on submarine pipelines under hall anchor dropping conditions[J]. *The Ocean Engineering*, 2024, 42(3): 179-189.
- [13] ZHENG X L, GE Y Q, LU Z F, CAO C, ZHOU P, LI S Q,

- et al. Study on buried depth protection index of submarine cable based on physical and numerical modeling[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2022, 10(2): 137. DOI: [10.3390/jmse10020137](https://doi.org/10.3390/jmse10020137).
- [14] 王懿, 贾旭, 黄俊, 段梦兰. 基于 CEL 的船舶抛锚入泥深度分析[J]. *石油机械*, 2014, 42(12): 44–47. DOI: [10.3969/j.issn.1001-4578.2014.12.010](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-4578.2014.12.010).
- WANG Y, JIA X, HUANG J, DUAN M L. Analysis of penetration depth of dropped anchor based on CEL[J]. *China Petroleum Machinery*, 2014, 42(12): 44–47.
- [15] ZHAO H J, ZHU Z H, CHE J W, CHEN W C, YIN Q, GUO D L, et al. Development of design chart for estimating penetration depth of dynamically installed Hall anchors in soft clays[J]. *Geomechanics and Engineering*, 2023, 34(2): 209–220. DOI: [10.12989/gae.2023.34.2.209](https://doi.org/10.12989/gae.2023.34.2.209).
- [16] 庄元, 宋少桥. 海底管线埋深问题研究[J]. *大连海事大学学报*, 2013, 39(1): 61–64. DOI: [10.3969/j.issn.1006-7736.2013.01.016](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-7736.2013.01.016).
- ZHUANG Y, SONG S Q. Study on the depth of submerged pipeline[J]. *Journal of Dalian Maritime University*, 2013, 39(1): 61–64.
- [17] 闫澍旺, 褚瑞花, 王武刚, 杨媛. 冲击荷载作用下岩土材料能量耗散的有限元分析[J]. *工程力学*, 2013, 30(5): 160–164. DOI: [10.6052/j.issn.1000-4750.2012.01.0018](https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2012.01.0018).
- YAN S W, ZHUO R H, WANG W G, YANG Y. Finite element analysis on energy dissipation of geo-materials incurred by impacting load[J]. *Engineering Mechanics*, 2013, 30(5): 160–164.
- [18] 臧志鹏, 许振, 邹星, 侯静. 块石和混凝土排垫保护下海底管道落锚撞击变形响应研究[J]. *海洋工程*, 2023, 41(4): 114–126. DOI: [10.16483/j.issn.1005-9865.2023.04.011](https://doi.org/10.16483/j.issn.1005-9865.2023.04.011).
- ZANG Z P, XU Z, ZOU X, HOU J. Deformation response of a submarine pipeline with rock berm+concrete mattress protection subjected to impact by a dropping anchor[J]. *The Ocean Engineering*, 2023, 41(4): 114–126.
- [19] KEERTHI RAAJ S, SAHA N, SUNDARAVADIVELU R. Freefall hydrodynamics of torpedo anchors through experimental and numerical analysis[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 243: 110213. DOI: [10.1016/j.oceaneng.2021.110213](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.110213).
- [20] 邢心魁, 滕德涛, 张家文, 刘晶, 孙冠晓. 基于最大抗剪强度的碎石配比研究[J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2014, 33(6): 59–62, 67. DOI: [10.3969/j.issn.1674-0696.2014.06.13](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-0696.2014.06.13).
- XING X K, TENG D T, ZHANG J W, LIU J, SUN G X. Broken stone gradation research under maximum shear strength[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)*, 2014, 33(6): 59–62, 67.
- [21] 杨尧, 罗强, 陈占. 客运专线级配碎石抗剪强度试验研究[J]. *路基工程*, 2010(4): 75–77. DOI: [10.3969/j.issn.1003-8825.2010.04.028](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-8825.2010.04.028).
- YANG Y, LUO Q, CHEN Z. Experimental study on shear strength of graded gravel for passenger dedicated line[J]. *Subgrade Engineering*, 2010(4): 75–77.
- [22] 任宇晓. 船舶拖、落锚运动及海底管线防护研究[D]. 天津: 天津大学, 2019.
- REN Y X. Research on the kinematic behavior of towing and falling ship anchor and the protection of submarine pipeline[D]. Tianjin: Tianjin University, 2019.

(编辑: 张雪琴)

基金项目:国家自然科学基金青年项目“近断层地震动下饱和上覆土层变形特征与海底管道动力破坏机理研究”, 52401339。

作者简介:杨泽亮, 男, 1981年生, 高级工程师, 2007年硕士毕业于中国石油大学(华东)材料学专业, 现主要从事海底管道结构设计、应力分析等方面的研究工作。地址: 天津市经济技术开发区第二大街83号中国石油天津大厦807室, 300457。电话: 13132281209。Email: yangzeliang@cnpc.com.cn

通信作者:张鹏宇, 男, 1984年生, 高级工程师, 2012年硕士毕业于美国罗德岛大学海洋工程专业, 现主要从事海底管道结构设计、应力分析等方面的研究工作。地址: 天津市经济技术开发区第二大街83号中国石油天津大厦1209室, 300457。电话: 18622519846。Email: zhangpengyu@cnpc.com.cn

• Received: 2024-09-09

• Revised: 2024-10-24

• Online: 2024-12-26

