沉箱非轨道出运小车基础核算

潘滢，王建军，颜如玉
（中交一航局第三工程有限公司）

摘　要：为了解决港航工程沉箱出运施工中，出运区域改造存在成本高、改造周期长、出运区域限制改造等问题，提出了对原结构改造少的小车非轨道出运工艺。通过分析荷载特性、地基承载力、基础结构选型和材料性能参数等关键要素，总结了结构强度复核、地基承载力验算、稳定性分析和动态响应验证等核算体系，并结合项目案例介绍了核算过程与应用效果。研究表明，非轨道出运小车基础核算需建立全链条分析体系，有限元建模与规范公式结合的方法，不同场地条件下特定方案能满足承载需求。研究成果可为类似工程提供参考。

关键词：沉箱；非轨道出运；基础核算；承载力；稳定性

0　引言

在港航工程建设中，沉箱作为重要的大型预制构件，其出运环节的安全性与经济性直接影响整个工程的进度与成本。随着沉箱向大型化、重型化发展，传统轨道式出运系统因场地改造费用高、建设周期长等问题，无法满足复杂的临时施工场景需求。非轨道出运系统凭借其灵活、场地适应性强的特点，逐渐成为大型沉箱出运的重要选择。非轨道出运[1]一般采用气囊出运[2]，气囊出运对于出运区域的基础平整度、沉箱结构的抗倾覆稳定性等均有较高要求，对于使用环境和沉箱结构均有限制。因此，非轨道出运小车工艺作为特定场景下的优选方案，在未来发展趋势中具有重要地位。

沉箱非轨道出运小车结构可更好适应出运区域的不同基础，并保证沉箱结构稳定性，保障施工核心环节安全。目前，非轨道小车出运普遍面临地基条件复杂、荷载分布不均等问题，亟需建立系统的核算体系。本文基于现有工程实践与理论研究，从核算关键要素、方法体系、工程案例及优化建议 4 个维度，对沉箱非轨道出运小车基础核算进行全面概述，以期为同类工程提供参考。

1　工程概况

某新建码头工程为重力式沉箱结构，沉箱分为 A、B 两种型号，其中 A 型沉箱结构尺寸（长×宽×高）为 25 m×7 m×12.2 m，单个沉箱重量 1 060 t，B 型沉箱结构尺寸（长×宽×高）为 20.5 m×7 m×12.2 m，单个沉箱重量 892 t。沉箱的施工场地受整体使用规划限制，仅允许在既有场地条件的基础上对预制台座及存放台座进行使用和硬化处理，预制区与存放区之间、存放区至出运码头之间仅允许沉箱移运时间段使用且不允许进行开挖换填内容施工。

基于以上情况，常规工程一般采用非轨道出运传统工艺的气囊出运，但是本工程由于场地可利用区域有限，预制后需要横移和纵移，2 次移运出运沉箱。当沿宽度 7 m 方向进行移运时，A 型与 B 型沉箱的高宽比均为 1.743（12.2∶7）；A 型沉箱长宽比为 3.29（23∶7），B 型沉箱长宽比为2.64（18.5∶7），均较大。采用气囊出运存在倾斜、滑移、破裂安全风险较大。因此，考虑采用非轨道小车出运。本文主要针对更加危险的 A 型沉箱的出运进行计算分析。

2　出运小车及计算条件分析

2.1　出运小车结构及布置

出运小车采用定制重型滚轮小车。这种小车采用滚轮设计，用于移动重型机械和设备，能自动将释放的滚轮送回前方重新定位，大幅降低事故风险，提高运输效率。该小车目前广泛应用于造船、钢铁、采矿、石油和核电等重工业领域。

本工程的出运小车采用国产定制重型滚轮小车（见图 1），该重型滚轮小车通过横向限位与纵向导向双重约束，有效避免沉箱移运过程中的偏移风险；多个小车间以钢管法兰螺栓刚性连接，形成整体的行走单元，保证多车协同作业，并可以根据沉箱的横纵移状态，进行动态调整和组合

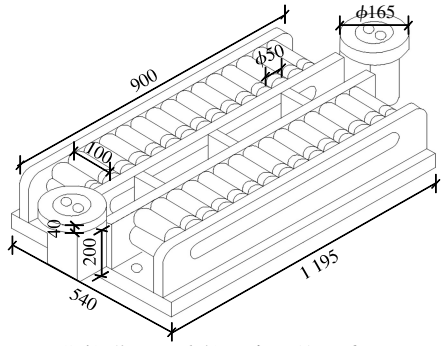


图 1　非轨道重型滚轮小车结构示意图(mm)

各小车布局，优化荷载分布，保证沉箱结构安全的同时，提升承载能力。相较于传统气囊移运工艺，其模块化结构与刚性连接设计，强化了整体结构稳定性和适应性，为大型沉箱高效移运提供可靠技术支撑。

小车基础采用高强度钢板铺设于码头面层，其上布设双钢轨，并通过焊接与钢板刚性连接如见图 2 所示。小车的行走动力采用液压夹轨顶推装置。

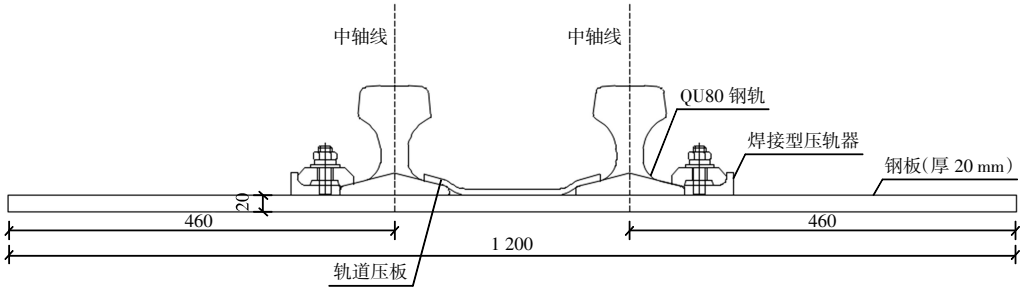
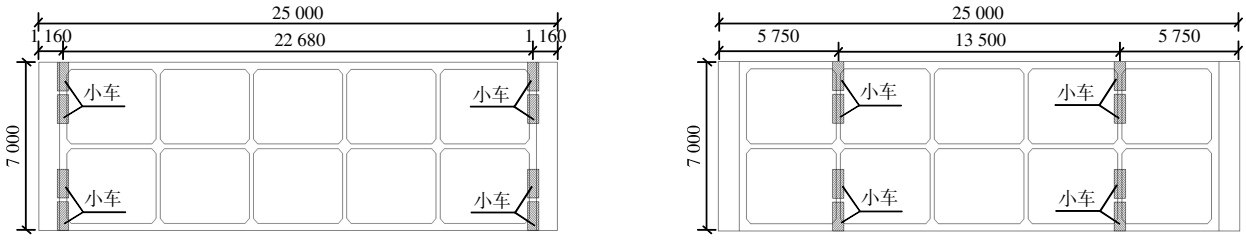


图 2　小车钢板–钢轨基础图(mm)

2.2　荷载特性分析

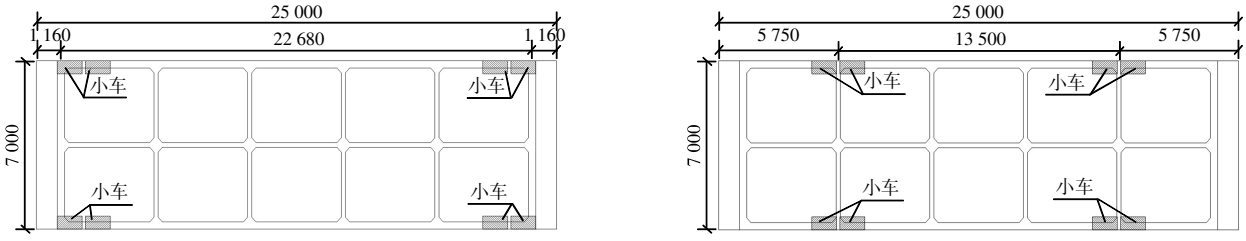
沉箱结构的受力与小车在沉箱底板下的布置形式有直接关系。考虑到经济性和施工便捷性，并结合本工程沉箱结构特点，横移和纵移均考虑 2 种方案。横移方案一：小车布置于两侧壁下侧，对称布设，见图 3(a)；横移方案二：小车布置于最外侧隔墙位置下侧，对称布设，见图 3(b)；纵移方案一：小车布置于前后壁与侧壁相交位置下侧，对称布设，见图 4(a)；纵移方案二：小车布置于前后壁与最外侧隔墙相交位置下侧，对称布设，见图 4(b)。

沉箱非轨道出运过程中的荷载主要包括静荷载与动荷载 2 类。静荷载以沉箱自重为主，根据沉箱尺寸与材料密度确定，如该项目中 1 060 t 沉箱的自重荷载需均匀分配至出运小车。动荷载则源于小车移动过程中的惯性、振动荷载及地面不平整引发的冲击荷载，其幅值通常为静荷载的 1.2~1.5 倍，需在核算中通过荷载分项系数予以考虑。



(a) 方案一　(b) 方案二

图 3　横移方案示意图



(a) 方案一　(b) 方案二

图 4　纵移方案示意图

荷载计算过程中沉箱自重取 1 060 t，2 组小车按每组小车 4 个计入，每个小车 13 个轮子，轮压标准值为 102 kN。另外，计算中考虑自重分项系数取 1.2，动载系数取 1.3。

2.3　地基承载力要求

施工场地地质结构从上到下依次为：联锁块（厚 100 mm），中粗砂垫层（厚 30 mm），水泥稳定石屑基层（厚 470 mm），级配碎石垫层（厚 950 mm），以及不小于 3 m 厚回填砂。对现场路面改造，面层连锁块移除，施工 250 mm 厚 C35 混凝土硬化及找平层。

根据 GB 50007—2011《建筑地基基础设计规范》[3]，地基承载力特征值需经现场勘察确定，当缺乏地勘资料时，可参考邻近工程类比取值。本项目参考出运码头地质参数，选取粉砂或细砂地基的承载力设计值（230 kPa）。由于沉箱移运区域为码头后方陆域，通过修正公式计算修正后的承载力：

$$f_a=f_{ak}+\eta_b\gamma(b-3)+\eta_d\gamma_m(d-0.5)$$

式中：f_a 为修正后地基承载力特征值，kPa；f_{ak} 为地基承载力特征值，kPa；η_b、η_d 分别为基础宽度和埋深的修正系数；γ 为基础底面以下土的重度，kN/m³；b 为基础底面宽度，m；γ_m 为基础底面以上土的加权平均重度，kN/m³；d 为基础埋置深度，m。

经计算，项目地基修正后承载力达 530 kPa，以此为基础设计地基承载力基准。

2.4　材料性能参数

核算需基于准确的材料性能参数，主要包括以下内容：

1）混凝土

C40 混凝土轴心抗压强度设计值为 19.1 MPa，轴心抗拉强度为 1.71 MPa。

2）钢材

Q235 钢板抗拉强度为 205 MPa（16 mm<钢板厚度≤40 mm）。

3）地基土

粉砂层的内摩擦角取 30°，黏聚力为 5 kPa，基床系数 80 000 kN/m³，用于弹性地基模型计算。

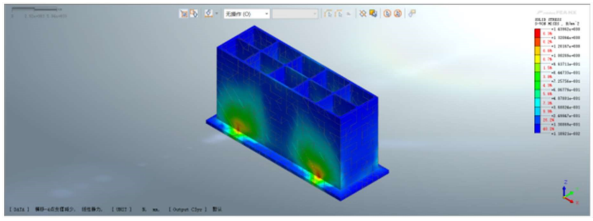
材料参数的选取结合了地质勘察报告与材料试验数据，确保核算结果的可靠性。

3　核算方法及结果

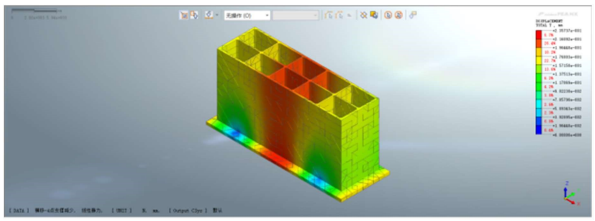
3.1　沉箱结构强度复核

采用有限元软件 midas FEA NX 进行沉箱整体建模，重点复核沉箱在横移、纵移过程中的应力与变形[4]。

1）横移方案一中小车布置于两侧侧壁下部；横移方案二中调整小车位置，布置于最外侧横隔墙下部，计算结果如图 5 所示。



（a）应力结果（MPa）

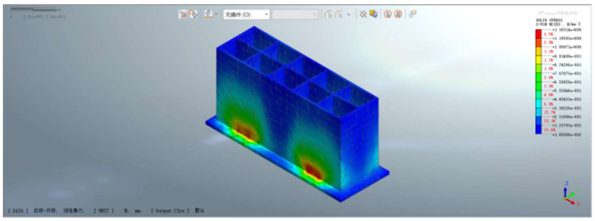


（b）变形结果（mm）

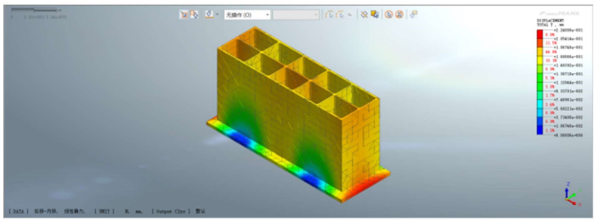
图 5　模移方案计算结果

横移工况下，方案一中小车布置于侧壁下部时，沉箱范式等效应力达 1.823 MPa，超过 C40 混凝土抗拉强度设计值 1.71 MPa。考虑到降低 2 组小车间距，将小车由两侧的侧壁下部调整至最外侧横隔墙下部，沉箱范式等效应力为 1.44 MPa 小于 1.71 MPa，满足要求。

2）纵移方案一中小车布置于前后壁下部；纵移方案二中调整小车位置，布置于前后壁与最外侧紧邻的横隔墙位置，计算结果如图 6 所示。



（a）应力结果（MPa）



（b）变形结果（mm）

图 6　纵移方案计算结果

纵移工况优化方式同横移工况，将小车布置于前后壁与横隔墙结合部，使应力从 1.722 MPa 降至 1.303 MPa 后，满足结构需求，验证了荷载传递路径优化的有效性。

变形控制指标方面，沉箱最大挠度需小于 $L/250$（L 为沉箱跨度），在项目中，横移最大变形为 0.235 mm、纵移最大变形为 0.224 mm，均满足刚度要求。

3.2　钢板厚度和宽度的选取

出运小车和现有硬化路面间铺设条状钢板。对原有地面进行硬化处理，采用 250 mm 厚 C35 混凝土找平。采用弹性地基建模，自重分项系数取 1.2，小车荷载分项系数取 1.5，基床系数取 80 000 kN/m^3，采用 midas Civil NX 建模，分别对不同厚度、宽度的钢板进行核算对比，计算结果如表 1 所示。

表 1　硬化区铺设钢板计算结果统计表

钢板宽度/m	钢板厚度/mm	反力/kN	钢板底应力/kPa	基底应力/MPa	结论
1.0	20	62.40	998.40	671.73	超限
1.5	20	29.12	465.92	355.57	满足
1.0	30	53.05	848.80	572.00	超限
1.5	30	28.84	461.44	352.21	满足
1.2	20	45.13	722.08	517.41	满足

当采用宽 1.0 m、厚 20 mm 的钢板时，上部通过轨道传递下来的线荷载经过钢板和基础扩散至基底的应力为 671.73 kPa，无法满足 530 kPa 地基承载力要求；通过加宽板宽至 1.5 m，基底应力 355.57 kPa，满足要求，且对该因素较敏感；通过加厚板厚至 30 mm，基底应力为 572.0 kPa，仍超限，说明对该因素不敏感；通过试算，厚 20 mm、宽 1.2 m 钢板，基底应力为 517.41 kPa，可以满足 530 kPa 地基承载力要求。

综上，采用的铺设钢板不得小于 20 mm 厚、1.2 m 宽。

3.3　地基承载力验算

荷载分布特性对基础核算至关重要。非轨道出运小车采用多轮组分散承重设计，如该项目中每组小车包含 4 个单元，每个单元设置 13 个轮子，单个轮压达 102 kN。轮压分布的均匀性直接影响基础结构的受力状态，核算时需通过小车布局优化（如对称布置于沉箱隔墙位置）实现荷载均衡传递。

地基承载力验算分为 2 步：首先按规范公式计算修正后承载力特征值，其次通过弹性地基板模型计算实际基底应力。对于既有硬化区域，采用条状钢板扩散荷载，宽 1.2 m、厚 20 mm 钢板可使板底应力控制在 517.41 kPa，小于地基承载力 530 kPa。

3.4　动态响应验证

采用 midas Civil NX 建立动力分析模型，模拟小车移动速度 0.6 m/min 时的振动响应[6]。结果表明，动载系数取 1.3 时，基础结构的应力幅值较静载工况增加 20%~30%，但仍在安全范围内。动态响应验证需结合现场振动监测数据，优化小车行驶速度与加速度，避免共振现象。

4　应用效果

通过本研究建立的系统核算体系，对沉箱结构、基础钢板及地基承载力等关键要素进行了精确控制，确保了 A 型沉箱安全高效出运。实际移运过程中，基础沉降量控制在 5 mm 以内，沉箱倾斜度不超过 0.3%，无异常振动或结构损伤现象的发生。

与传统气囊出运方案相比，非轨道小车工艺显著提升了安全性，避免了气囊破裂、滑移等潜在风险；与轨道式方案相比，节省场地改造费用约 200 万元，缩短工期 2 个月，体现了其在复杂场地条件下的经济性和可靠性。该工艺的应用不仅保障了工程进度，还为类似港航项目提供了可复制的技术路径。

5　结语

本文结合工程实践与理论研究，对非轨道出运小车基础进行系统核算分析，从核算关键要素、方法体系、工程案例及优化建议 4 个维度，全面总结了该工艺出运小车基础核算的核心要点，得出以下结论：

1）非轨道出运小车基础核算需综合考虑荷载特性、地基条件、结构选型与材料性能，建立“荷载传递—结构响应—地基承载”的全链条分析体系。施工前，应开展详细的地质勘察，明确地基土的分层特性以及物理力学参数，确保核算参数的准确性，降低因地质不确定性导致的设计偏差风险。

2）有限元建模与规范公式结合的核算方法可有效验证沉箱结构、基础结构的强度、刚度与稳定性，为工程设计提供量化依据。

3）重型滚轮小车的布置要根据待运输结构跨度和现场施工的便捷性，以及定制小车的造价，综合考虑可行性及经济性，从而确定最终方案。

4）临时轨道宜采用模块化钢材或预制混凝土构件，增强施工灵活性与材料回收率，降低工程成本并提高资源利用效率。

5）施工现场应部署实时监测系统，动态采集基础沉降、结构应力及沉箱姿态数据，通过数据反馈及时调整施工参数，从而确保移运过程安全可控。

通过完善核算方法与施工管理，非轨道小车出运工艺可进一步推动港航工程智能化、绿色化发展，为港航工程中大型沉箱非轨道小车出运提供科学指导与技术支持。

参考文献：

[1] 刘兰鹏. 码头工程沉箱出运及安装施工技术研究[J]. 科学技术创新，2023(13)：148-151.

[2] 贾俊. 场地不均匀沉降条件下沉箱移动技术[J]. 珠江水运，2024(10)：37-39.

[3] GB 50007—2011 建筑地基基础设计规范[S].

[4] JTS 151—2011 水运工程混凝土结构设计规范[S].

[5] JTS 167—2018 码头结构设计规范[S].

[6] GB 50009—2012 建筑结构荷载规范[S].