



组合型轨道梁结构在码头中的应用

何元塘，金泰赛

(广东省航运规划设计院有限公司，广东 广州 510050)

摘要：以阳江某重力式码头后轨道基础为工程实例，通过对常用轨道基础结构的分析论述，提出一种组合型轨道梁结构，解决轨道式起重机重载作用下，弹性地基梁使用期沉降调节难度大的问题。基于文克尔假设，采用有限元软件 Midas Civil 对地基梁、钢轨、轨枕等进行计算分析，结果满足工程使用要求。组合型轨道梁结构设计合理，与常规方案对比，其结构综合性能优、经济性能较好。组合型轨道梁结构的应用研究可供类似工程参考借鉴。

关键词：重力式码头；轨道梁；弹性地基梁；轨枕

中图分类号：U 656.1

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2023)02-0087-05

Application of combined rail beam structure in wharf

HE Yuan-tang, JIN Tai-sai

(Guangdong Province Planning & Design Institute for Navigation Co., Ltd., Guangzhou 510050, China)

Abstract: Taking the rear rail foundation of a gravity wharf in Yangjiang as an engineering example, this paper analyzes the common rail foundation structure and puts forward a combined rail beam structure to solve the problem of difficult post-settlement adjustment of the elastic foundation beam during its service period under the action of a heavy-loaded rail crane. Then, the paper calculates and analyzes the foundation beams, steel rails, and sleepers with the finite-element software Midas Civil on the basis of the Winkler hypothesis. The results meet the requirements of engineering application. The design of the combined rail bearer structure is reasonable. Compared with the conventional scheme, it has better comprehensive performance and economic performance. The application research of the proposed combined rail beam structure can serve as a reference for similar projects.

Keywords: gravity wharf; rail beam; elastic foundation beam; sleeper

近 60 年来，港口的基础设施依靠科技进步发生了深刻变化，如码头结构形式多样化，装卸机械的高效率、自动化趋势愈加明显。为了提升码头的竞争能力、缩短船舶在港时间，装卸机械常被寄予较高期望，其作业连续性对码头的实际通过能力有实质性影响。根据对阳江港吉树作业区在用码头后轨道基础结构的基本调查，采用非桩基式轨道基础结构在使用期需经常调节轨顶高程，特别是轨枕道砟结构调节频率高，对装卸作业的连续性影响最大。重力式码头前沿装卸机械前轨道一般置于码头胸墙上，后轨道基础形式根据码头结构宽度、墙后回填材料、工程地质等情况确

定。当沉箱宽度较小时，后轨道基础需单独布置，根据墙后回填材料情况一般采用轨枕道砟结构、钢筋混凝土轨道梁（板）结构、桩基础轨道梁结构^[1-2]。这几种常规的结构方案技术成熟，应用广泛，且各有优缺点。如能将其中 2 种结构方案的优点组合、缺点互补而形成“基本沉降量较小、沉降后调节简便”的结构方案，即可减少对装卸机械作业连续性的影响。本文基于阳江某码头工程实例，结合码头墙后回填材料，对常规的弹性地基梁、桩基础轨道梁、轨枕道砟的结构性能及适应性进行分析，最终采用“弹性地基梁+轨枕道砟”组合结构作为码头后轨道基础。

1 工程概况

阳江某 3 000 吨级多用途码头(结构按 1 万吨级预留)采用重力式沉箱结构。码头长度 150 m, 顶高程 5.0 m, 沉箱底高程 -9.7 m。沉箱顶部为现浇 L 形钢筋混凝土胸墙, 根据工程所在地回填

料供应情况及使用期荷载条件考虑, 墙后抛填 10~100 kg 块石棱体。码头前沿装卸设备采用 MQ5033 多用途门机, 轨距 10.5 m, 前轨置于现浇胸墙上、距前沿线 3.0 m; 后轨道基础采用“弹性地基梁+轨枕道砟”的组合型结构(图 1)。

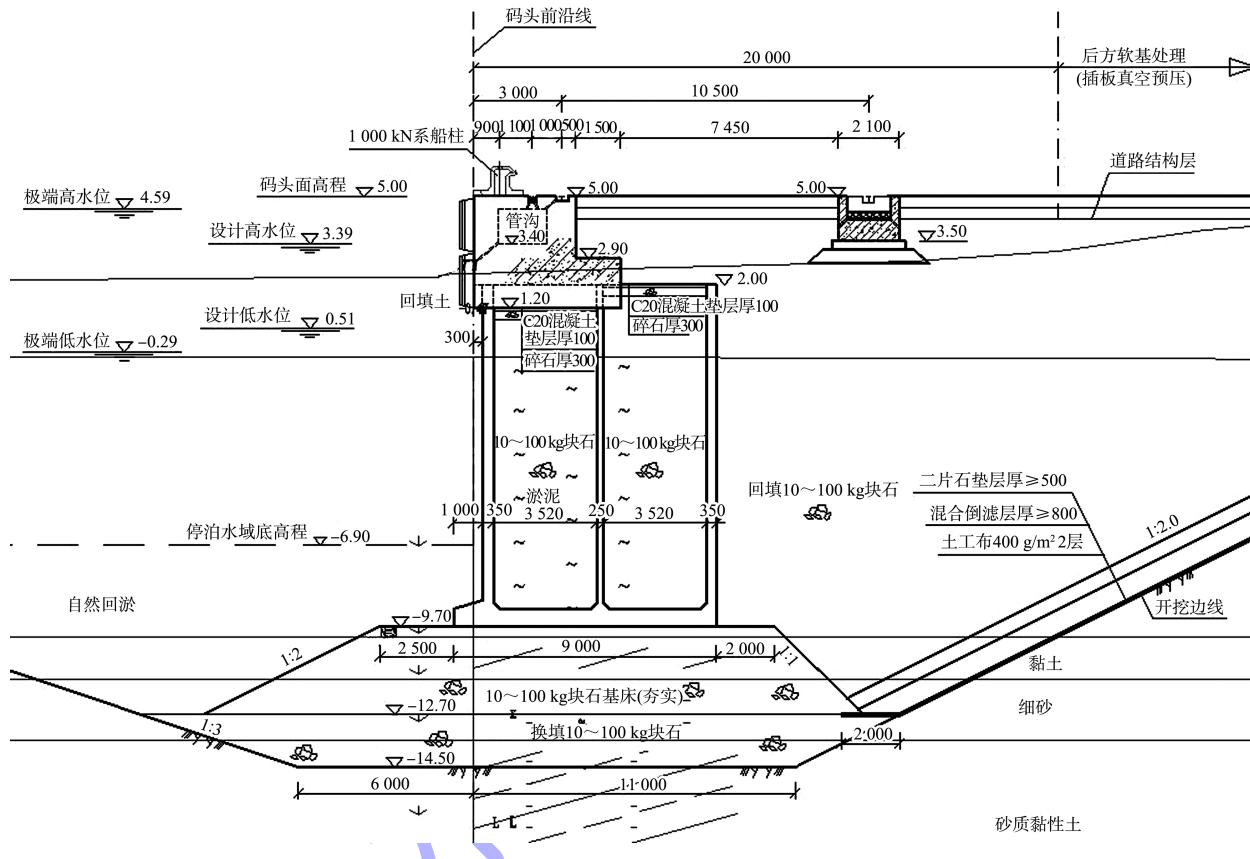


图 1 码头结构断面 (高程: m; 尺寸: mm)

2 设计思路

轨道梁作为轨道式装卸机械的基础, 其质量及结构性能等对装卸机械影响较大。常规的弹性地基梁结构、桩基础轨道梁结构、轨枕道砟结构各有优缺点。弹性地基梁整体性好, 刚度大, 沉降较小, 但沉降后调节难度大; 桩基础轨道梁沉降最小, 结构受力明确, 但造价高; 轨枕道砟结构结构简单, 用料少, 造价低, 轨顶高程调节方便, 但结构整体性差, 承载力低, 沉降大。

1) 弹性地基梁结构各方面相对均衡, 且本工程码头后方抛石棱体可为地基梁提供良好的承载力, 但是长期使用下也有一定的沉降, 当沉降超过一定程度时将影响门机使用, 沉降后轨顶高程调节难度非常大, 一般需要补浇筑沉降部分高度、重新安装钢轨及锚固系统, 调节工期长、费用高^[3]; 也有个

别工程在锚固系统设计时采用可调节式结构, 但调节范围有限, 一般不超过 100 mm, 且属于锚固系统厂家专利产品, 选型有限且造价相对较高。

2) 桩基础轨道梁结构性能最优, 但本工程码头后方为抛石棱体, 造价相对低廉的 PHC 管桩无法穿透较厚的抛石棱体层, 如采用冲孔灌注桩, 不仅工程造价高, 且灌注桩穿透较厚抛石层进度较慢, 施工总进度控制难度大, 不适合作为陆侧轨道梁基础。

3) 轨枕道砟结构材料用量少, 造价低, 但结构性能最差, 使用期要经常调节, 对生产运营影响较大, 不建议作为本码头陆侧轨道梁基础。

基于上述分析, 较倾向采用弹性地基梁结构, 但需解决弹性地基梁使用期沉降调节难度大的问题, 故本次设计思路是以弹性地基梁为基础, 寻

求便于调节使用期沉降的方案。

3 设计方案及结构计算

3.1 设计方案

后轨道基础的设计需结合工程造价、施工总体进度、结构性能等综合考虑，确定较为合适的轨道基础结构。以弹性地基梁为基础，通过与轨枕道砟结构组合的形式来满足使用期沉降调节方便的结构方案。

码头后轨道梁长 118.9 m, 共分为 4 个结构段, 根据发展需要, 南护岸预留码头功能, 其后

轨道梁长 232.8 m，共分为 8 个结构段。后轨道基础均采用“弹性地基梁+轨枕道砟”的组合型结构，轨道梁各结构段之间采用传力杆连接。组合型轨道梁结构自上而下依次为 C40 钢筋混凝土轨枕、级配道砟、槽型截面 C40 钢筋混凝土轨道梁、C15 素混凝土垫层、级配碎石垫层。其中轨枕长 1 480 mm、宽 580 mm、高 530 mm，顶部设起吊孔，轨枕安装间距 600 mm；级配道砟厚 270 mm；槽型轨道梁宽 2 100 mm、底板厚 700 mm、两侧梁挡高 800 mm；素混凝土垫层厚 300 mm，级配碎石垫层厚 500 mm，同时要求压实度不低于 96%（图 2~4）。

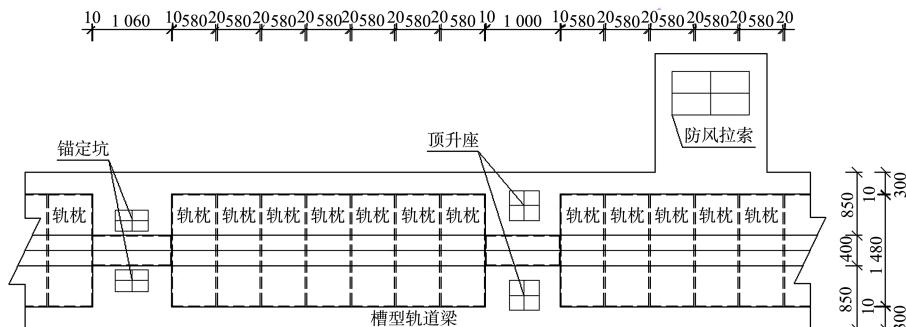


图 2 轨枕安装 (单位: mm)

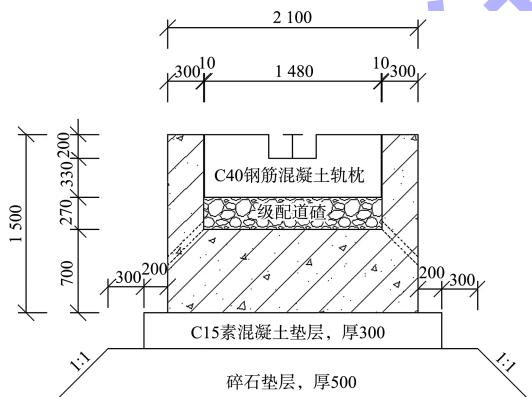


图 3 轨道梁断面 (单位: mm)



图 4 组合型轨道梁实施效果

当使用期槽型轨道梁累计沉降量大于门机使用的允许值时，可根据沉降情况起吊轨枕，补填级配道砟至新高程后重装轨枕，即可完成使用期的沉降调节。

该结构方案类似惠州荃湾煤码头一期工程的斗轮取料机轨道板结构，通过多层结构传递轨道荷载，使地基表面均匀受力，减少不均匀沉降的发生，在沉降后又可以通过加高中间层结构来调节轨顶高程，满足轨道起重设备行走要求。此轨道板式结构自上而下由轨枕（底部涂刷沥青）、素混凝土垫层、钢筋混凝土轨道槽组成，当使用期沉降过大、影响使用时，仅需补浇素混凝土垫层（中间层）调节轨顶高程，较常规方案更加简便。

与轨道板结构不同，本方案槽型轨道梁和轨枕之间采用道砟充填，道砟相对于素混凝土垫层而言为柔性垫层，对轨道设备行走时产生的冲击及振动化解效果好，且补填后不存在结构性能较差的结合面。

3.2 结构计算

3.2.1 设计参数

1) 码头使用期轨道梁上主要为门机荷载和结构自重力。①门机荷载: 码头前沿配备 2 台 MQ5033 门机, 轨距 10.5 m, 基距 10.5 m; 门机最大轮压 400 kN/轮, 8 轮/支腿, 轮距 0.85 m。锚锭水平力 178.5 kN/座; 顶升力 756 kN/座; 防风系统上拔力 258 kN/座, 水平力 307 kN/座。②结

构自重力: 钢筋混凝土结构取 25 kN/m³、级配道砟取 17 kN/m³。

2) 结构内力计算时, 材料参数见表 1~2, 地基参数见表 3。

表 1 轨道梁和轨枕参数

构件	密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	弹性模量 E_s/GPa	泊松比 ν	强度等级
钢筋混凝土轨道梁	2.5	32.5	0.2	C40
钢筋混凝土轨枕	2.5	32.5	0.2	C40

表 2 钢轨参数

构件	截面面积 A/cm^2	每延米质量/ $(kg \cdot m^{-1})$	截面惯性矩 I_x/cm^4	下部截面模量 W_1/cm^3	上部截面模量 W_2/cm^3	材料牌号	抗拉强度 /MPa
QU100 钢轨	113.44	89.05	2 806.11	367.87	380.64	U71Mn	≥880

表 3 地基参数

土类	密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	水下密度 $\rho'/(g \cdot cm^{-3})$	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	黏聚力 c/kPa	弹性模量 E_s/MPa	基床系数/(MN·m ⁻³)
块石棱体	1.7	1.0	45	0	40	50
道砟	1.7	1.0	35	0	40	50~100

3.2.2 计算方法

本工程槽型轨道梁为天然地基轨道梁, 目前有 3 种常用的计算理论和假设, 一是假设地基反力直线分布; 二是文克尔假设; 三是理想弹性体假设。目前我国在设计船台、滑道、干船坞时大多采用文克尔假设, 该假设认为地基变形仅发生在基础范围内, 地基中只有法向力而没有剪力, 地基变形只局限于基础底面的范围内。事实上, 由于地基中存在剪应力, 使得基底压力在地基中产生应力扩散作用, 使基底以外的地表产生沉降, 因此, 基于文克尔假设的地基模型与实际情况有一定差异。该假设尽管在理论上存在缺陷, 但能考虑地基梁和地基之间相对刚度的影响, 且使用较为方便, 如基床系数 k 值选用得当, 计算结果能满足工程的要求。

本工程基于文克尔假设, 采用有限元软件 Midas Civil 进行建模计算。轨道梁、钢轨均采用杆系梁单元进行模拟, 轨道梁结构段处考虑传力杆及跨缝铺设钢轨的作用, 按铰接处理(图 5); 钢

筋混凝土轨枕可不考虑弯曲系数折减, 轨枕长度相对较短, 荷载较小时可近似认为基底反力均匀分布, 按一般静定梁计算内力, 但本工程门机荷载较大, 道砟呈弹性支承的特性相对明显, 因此可适当提高道砟的基床系数用于计算轨枕内力。由于轨道梁纵向长度长, 轨道梁长度方向的地质不均匀^[4], 在实际设计过程中, 无法有效模拟整个长度内的地质变化, 且文克尔假设忽略地基中的剪应力作用及相邻地基的变形, 不适用于弹性地基梁的沉降量分析计算。

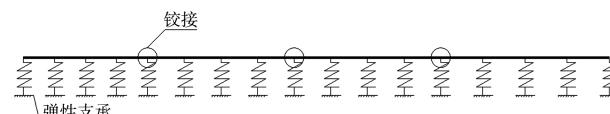


图 5 Midas Civil 模型

3.2.3 计算结果

1) 轨道梁内力及配筋见表 4, 弯矩和剪力计算结果见图 6。

表 4 轨道梁内力及配筋

工况	弯矩/(kN·m)	剪力/kN	配筋/mm ²	抗弯强度/(kN·m)	抗剪强度/(kN·m)	裂缝宽度及限值/mm
承载能力极限状态	2 547/-2 387	1 476	2 8951/24 126/φ14@ 200	5 045/-4 392	2 118	-
正常使用极限状态	1 021/-957	-	-	-	-	0.12/0.20

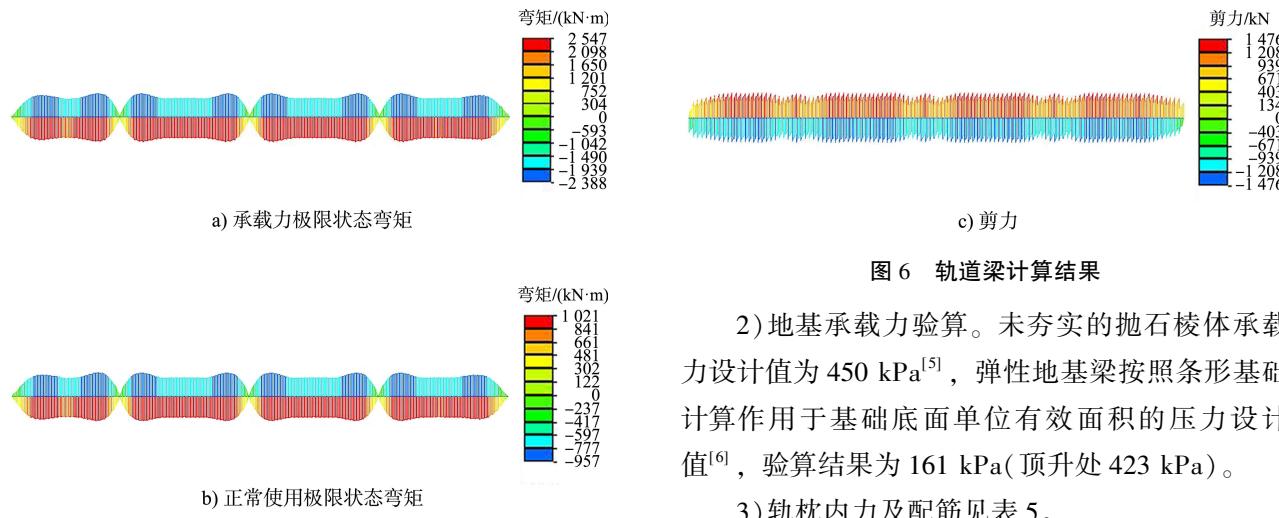


图 6 轨道梁计算结果

2) 地基承载力验算。未夯实的抛石棱体承载力设计值为 $450 \text{ kPa}^{[5]}$, 弹性地基梁按照条形基础计算作用于基础底面单位有效面积的压力设计值^[6], 验算结果为 161 kPa (顶升处 423 kPa)。

3) 轨枕内力及配筋见表 5。

表 5 轨枕内力及配筋

工况	弯矩/(kN·m)	剪力/kN	配筋/mm ²	抗弯强度/(kN·m)	抗剪强度/(kN·m)	裂缝宽度及限值/mm
承载能力极限状态	121/0	266	$2945/\phi 14 @ 100$	232	761	-
正常使用极限状态	49/0	-	-	-	-	0.11/0.20

4) 道砟应力验算。作用在道砟上的最大压应力为 395 kPa , 允许压应力为 500 kPa 。

5) 钢轨内力及应力计算。钢轨为弹性支承连续梁, 考虑轨枕布置紧密, 计算时可转化成连续的弹性地基。根据《港口水工建筑物》(第2版), 轨枕弹性系数为:

$$R = \beta b L C \quad (1)$$

式中: β 为钢筋混凝土轨枕弯曲系数, 取 1.0; b 和 L 为轨枕底部尺寸; 道床系数 C 按道砟和抛石棱体取值, 为 50 MN/m^3 。钢轨的轨道系数 $u = R/a$, a 为轨枕安装间距。计算结果见表 6。

表 6 钢轨内力及应力计算结果

轨枕弹性系数 $R/(\text{MN} \cdot \text{m}^{-1})$	钢轨轨道系数 $u (\text{MN} \cdot \text{m}^{-2})$	弯矩/(kN·m)	剪力/kN	应力/MPa	钢轨允许应力/MPa
42.920	71.533	129/-101	559	341	880

4 技术经济指标

针对本工程的具体情况, 对组合型轨道梁结构与常规的弹性地基梁结构、桩基础轨道梁结构、轨枕道砟结构进行技术经济指标对比, 见表 7。由表可知, 桩基础轨道梁造价高, 组合型轨道梁结构的技术经济指标与弹性地基梁、轨枕道砟较为接近, 经济性能较好。

表 7 组合型轨道梁与常规方案技术经济指标对比 万元/m

组合型轨道梁	弹性地基梁	桩基础轨道梁	轨枕道砟
0.91	0.85	3.26	0.86

5 结语

1) “弹性地基梁+轨枕道砟”组合型轨道梁结构综合了弹性地基梁整体性好、刚度大及轨枕

道砟便于沉降调节的优点, 可有效解决轨道式起重机重载作用下弹性地基梁使用期沉降调节难度大的问题, 且经济性能较好。

2) 组合型轨道梁结构强度可采用基于文克尔假设的弹性地基梁法进行计算分析, 结果满足使用要求, 但弹性地基梁在沉降分析时不宜忽略土体剪应力及地基的塑性变形作用, 建议基于摩尔-库仑破坏准则, 建立弹塑性实体三维有限元数值模型, 进一步分析和研究地基的弹塑性变形。

参考文献:

- [1] 韩理安.港口水工建筑物[M].2 版.北京:人民交通出版社, 2008.
- (下转第 115 页)