



高坝通航枢纽中省水船闸方案探讨*

张星星, 陈明栋, 许光祥, 陈明

(重庆交通大学 水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074)

摘要: 阀门水力学问题一直是高水头船闸设计的关键技术难点。以在建的大藤峡单级船闸为例, 基于国外省水船闸工作原理, 提出带两级蓄水池船闸方案。输水系统水力学初步计算表明, 阀门工作水头削减 20.125 m, 省水率可达到 48.76%。与单级船闸方案比较结果表明, 该输水系统形式因水头大幅降低, 设计和建造均大为简化, 在山区河流高坝通航领域以及兼顾发电与农业灌溉用水紧张的情况下, 应用前景非常广泛。

关键词: 高水头; 省水船闸; 输水系统; 高坝通航

中图分类号: U 641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)05-0076-06

Filling and emptying system for water-saving ship lock in high-dam navigation

ZHANG Xing-xing, CHEN Ming-dong, XU Guang-xiang, CHEN Ming

(Key Laboratory of Hydraulic and Waterway Engineering of the Ministry of Education, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: Valve hydraulics problems are the key technical problems in single-step locks with high head. The lock with two levels of water-saving pools is carried out to solve the problem in Datengxia lock, based on the theory of water-saving shiplock abroad. It is concluded that the water-saving shiplock can reduce the work head with 20.125 meters and the water-saving rate is 48.76%. Comparing with the single-step locks, it can simplify the filling and emptying system because of the lower head. Besides, the water-saving shiplock has a broad application prospect in high dam navigation which considers both power and agricultural irrigation.

Keywords: high head; water-saving shiplock; filling and emptying system; high dam navigation

1 高水头船闸发展概况

船闸作为一种成熟的通航建筑物形式, 主要应用于中低水头枢纽, 水头超过 40 m 时, 通常采用升船机方案和多级布置。但是随着内河水运事业的飞速发展和船闸建造技术的不断进步, 高水头单级船闸不断出现, 如乌江银盘船闸(36.5 m)、赣江万安船闸(32.5 m)、哈萨克斯坦 Ust-Kamenogorsk 船闸(42.0 m)、俄罗斯 Zaporojie 船闸(39.2 m)、葡萄牙 Carrapatelo 船闸(34.5 m)等。可见, 国内外船闸正逐渐向高水头、大规模的趋势发展。但是, 随着船闸工作水头的提高, 船闸输水阀门段

廊道出现的空蚀和空化问题突出。近年来, 虽然在解决高水头阀门水力学技术领域取得了较大突破, 如降低阀门段廊道高程、将阀门段廊道设计为突扩体型以及在阀门段关键部位设通气孔等方法收效显著, 但是, 由于阀门水力学技术的复杂性, 实施上述技术措施不仅花费巨大, 而且难以保证达到理想的效果。

2 省水船闸原理及研究现状

2.1 工作原理

省水船闸一般是在闸室的一侧或两侧设置若

收稿日期: 2015-11-04

*基金项目: 重庆市研究生科研创新项目 (CYB15112)

作者简介: 张星星 (1990—), 男, 博士, 从事通航水力学及船闸水力学方面的研究。

干级蓄水池以达到省水和合理利用水资源的目的。主要有2种布置形式:一种是在船闸一侧或两侧布置水平分层的蓄水池,称为封闭式(图1);另一种是在船闸的一侧错落布置蓄水池,称为开敞式(图2)。相关研究成果表明,开敞式结构简单,省水池布置可以部分重合,水级划分相对灵活,适用于水位变化频繁的山区河流^[1-2]。因此,德国绝大部分省水船闸采用开敞式布置形式。省水船闸工作原理简单,以图1为例,船闸充水时,第二级蓄水池先向闸室充水,然后由第一级蓄水池向闸室充水,最后不足的水量由上游水库补充。泄水过程与充水过程刚好相反,闸室水体不直接往下游倾泄,而是先泄向第一级蓄水池,装满后再泄向第二级蓄水池,剩下的一部分水泄往下游。不难发现,在省水船闸充水和泄水过程中都对工作水头进行了分级,为此人们开始思考,利用带省水池船闸工作原理,在减少船闸耗水的同时,还可降低超高水头单级船闸的阀门工作水头,是技术上的一大进步。研究发现,省水船闸采用省水池的级数不同时,通过灌泄水过程中的水体交换,基本上均能成倍地降低阀门工作水头,由此可以有效地避开复杂的阀门水力学难题,避免阀门产生空蚀、空化问题破坏^[3]。

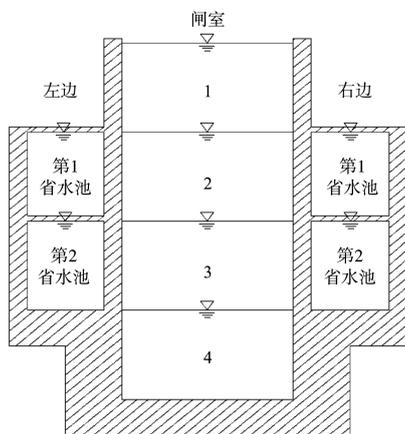


图1 封闭式省水船闸

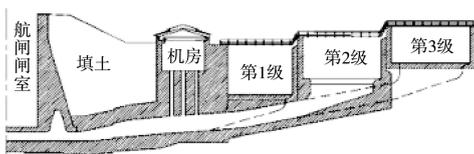


图2 德国典型开敞式省水船闸剖面

2.2 研究现状

在三峡多级船闸方案研究中,有学者提出采用三峡带调节水池连续三级船闸方案来取代目前已经建成的连续五级方案^[4]。但由于高边坡闸墙等前期研究工作较为滞后,因而未能被三峡工程采用。省水船闸在国外应用非常普遍,主要用于节约航运耗水,建造技术成熟,运行状况良好。国外第一个提出省水船闸的是法国人卡莱利,他在罗亚尔河的乌博埃船闸开启了省水船闸部分试验^[5]。德国是世界上建造省水船闸最多的国家,目前拥有20余座,在枢纽布置、输水系统设计、省水池运行方式等方面均达到国际领先水平。省水船闸在我国鲜有报道,但早在1959年,天津大学在三峡船闸方案研究中就提出设计该形式。省水船闸在我国的首次应用是桂林春天湖船闸(2.68~4.55 m),设计采用双线省水形式,两厢闸室并排布置,互为贮水池,省水率约50%,巧妙地解决了水量不足的矛盾,合理利用了水资源^[6]。2006年,重庆交通大学陈明栋等根据德国省水船闸原理,总结前人的研究成果,针对乌江银盘船闸(36.5 m)提出了带两级省水池的船闸输水系统方案,在满足省水需求的前提下,实现了降低阀门工作水头的目的^[3]。王健等^[7-8]通过乌江银盘船闸整体水工模型水力学试验,得出省水船闸可成倍削减水头,能够避开阀门空化问题,且输水系统和省水池水力特性均满足规范要求,同时约50%省水率是合乎实际的。随后,陈明栋等^[2,9]初步探讨了省水船闸在高坝通航和山区河流中的应用;杨忠超等^[10]建立了银盘省水船闸运行数学模型,分析了灌、泄水结束后省水池水位与阀门启闭速度及阀门开启提前量的关系,获得了最优的阀门启闭速度和最佳的提前量。考虑枢纽布置、山体开挖等原因,该船闸方案未能应用于乌江银盘船闸中,但是现有丰硕的研究成果为省水船闸在我国山区河流的推广应用打下了坚实的基础。

3 工程算例

近年来,随着西部大开发不断深入,我国水

电开发建设进入黄金时期,众多大型水利枢纽将陆续兴建,如红水河大藤峡、乌江白马、右江百色等。这些高坝通航建筑物抬高水级均在30 m以上,如何有效解决阀门水力学问题是船闸输水系统设计的关键技术难点。笔者依托在建的红水河大藤峡单级船闸,就省水船闸方案在高坝通航枢纽中的应用展开讨论,以期为后续高水头单级船闸输水系统选型提供参考,推动省水船闸在我国的发展。

大藤峡水利枢纽是南盘江红水河水电基地综合利用规划10个梯级中的最末一级,是国务院批准的珠江流域防洪控制性枢纽工程,也是珠江—西江经济带和“西江亿吨黄金水道”基础设施建设的标志性工程,是两广合作、桂澳合作的重大工程,其航运地位和作用不言而喻。大藤峡船闸位于枢纽左岸,按照Ⅰ级标准建设,设计水头高达40.25 m。针对大藤峡船闸输水系统设计,国内学者做了大量研究工作。丛广明等^[11]根据船闸水工模型试验确定选用底部纵支廊道立交分流二区段出水盖板消能输水系统,并采用突扩体门楣和门后低压区通气相结合的方法来解决阀门空蚀空化问题,其输水系统水力性能指标、阀门防止空化措施等还需建立相关水力学专题系统研究。覃业传等通过分析已建国内外超高水头船闸,得出现有技术能够解决大藤峡单级船闸的水力学问题,但是复杂输水系统相关水力学指标(充泄水时间与闸室停泊条件)、由船闸巨大充泄水流量带来的引航道水流条件与船舶航行安全、阀门空化等关键技术难题仍需开展深入研究^[12]。

4 大藤峡省水船闸方案布置设计

4.1 蓄水池级数确定

杨忠超等^[13]在省水船闸省水效益分析中指出,在蓄水池级数相同的情况下,蓄水池面积越大,省水效率越高,但蓄水池与闸室面积比大于3时,省水效率增加有限;而面积一定时,蓄水池级数越多,则省水效率越高,但超过3级后,省水效率增加不明显。这就是德国绝大部分省水船闸一

般只设三级蓄水池,且蓄水池面积等于闸室面积的主要原因。故根据大藤峡船闸的设计水头,提出布置两级与三级蓄水池,综合比较两种方案的省水率、最大工作水头等参数。

4.1.1 省水率

当蓄水池面积与闸室相同时,由省水船闸工作原理可知,两个蓄水池理论上可以节省50%的水体,3个蓄水池为60%,依此类推。但省水船闸在运行中为了缩短输水时间,阀门往往拥有提前开启量,同时考虑充泄水过程中水位波动,故实际省水率按下式计算^[10]:

$$E = \frac{m(H-2\Delta H)}{H(m+2)} \quad (1)$$

式中: m 为省水池个数; ΔH 为剩余水头。代入数据得出,两级蓄水池的省水率为48.76%,而三级蓄水池为58.51%。

4.1.2 最大工作水头

带两级蓄水池船闸将工作水头均分成4份,每份水头为10.0625 m,2个蓄水池分别布置在闸室1/2、3/4高度处,根据省水船闸工作原理,阀门最大工作水头为20.125 m;同理,带三级蓄水池方案把水头平均分成5份,蓄水池布置在闸室的2/5、3/5、4/5高度,最大工作水头为16.10 m。

表1是两级省水船闸与三级省水船闸的各个参数对比分析表。从表1可以看出,两种方案的阀门工作水头均成倍削减至20 m左右,成功地规避了技术复杂、花费高昂的高水头船闸阀门空蚀空化问题,使输水系统的设计和建造大大简化;省水率也相差无几,缓解了航运与发电之间的矛盾,合理利用了水资源。但是省水船闸的特点是阀门多,启闭繁琐复杂,一个蓄水池一次灌水过程,启闭时按照一定程序,环环相扣,不能间歇。由于三级省水船闸方案多布置一级蓄水池,阀门数增至10个,导致充泄水时间延长,直接影响船闸的通过能力。与此同时,多出的蓄水池还将导致山体开挖量与输水廊道数增加,工程造价急剧攀升,而且给枢纽布置与船闸整体运行方式带来较大困难,不利于后期的维护与管理。因此,综合考虑,建议采用两级省水船闸方案。

表 1 带两级与三级蓄水池方案主要特性比较

方案	总水头/m	阀门最大工作水头/m	蓄水池面积	省水率/%	阀门/个
两级蓄水池方案	40.25	20.125	与闸室相同(2个)	48.76	8
三级蓄水池方案	40.25	16.100	与闸室相同(3个)	58.51	10

4.2 输水系统设计

船闸整体输水系统由闸室输水系统和蓄水池输水系统两部分组成, 其中闸室输水系统采用闸墙长廊道和闸底两区段纵支廊道布置, 蓄水池由独立的廊道与闸墙长廊道水平相连(图 3)。消能设施采用双明沟形式, 研究显示, 增加明沟消能的体积可在平面上扩大水流扩散的面积, 使闸室水流的水体紊动、局部壅高最小, 流速分布最均匀, 从而提高闸室内过闸船舶的安全性^[14]。2 个蓄水池采用开敞式, 平行交错布置在闸室一侧, 呈阶梯型, 每个水池可容纳 1/4 水头的闸室水深的水体, 各部位主要尺度如表 2 所示。

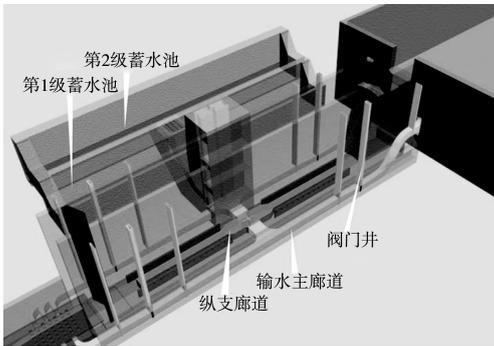


图 3 大藤峡省水船闸输水系统布置

表 2 船闸输水系统主要尺度

位置	计算面积/m ²	总面积/m ²	与阀门段廊道面积比
主廊道	2×5.5×7.5	82.50	1.30
阀门段廊道	2×5.5×5.8	63.80	1.00
分流消能室	2×11.8×7.5	177.00	2.77
闸底纵支廊道	2×5.9×7.5	88.50	1.39
闸室出水口	4×15×0.90×1.64	88.56	1.39
下游出水口	2×6.5×6.87	89.32	1.40
蓄水池主廊道	8.5×8.0	68.00	1.07
蓄水池阀门段廊道	8.5×8.0	68.00	1.07

4.3 水力计算成果

船闸输水系统的布置和设计需满足两方面要求: 1) 输水时间满足船闸的通过能力和营运效益的要求; 2) 水流条件必须保证船舶在闸室及引航道内停泊和航行安全。可见, 船闸输水系统的技术性能, 是保证船闸高效和安全运行的关键技术之一。

4.3.1 充泄水时间

大藤峡省水船闸充水时间主要由蓄水池向闸室充水时间和上游向闸室充水时间两部分组成。根据《船闸输水系统设计规范》, 闸室充泄水时间按式(2)计算:

$$T = \frac{2\Omega\sqrt{H_0+d}-\sqrt{d}}{\mu\omega\sqrt{2g}} + (1-\alpha)t_v \quad (2)$$

式中: T 为闸室充(泄)水时间; Ω 为闸室水域面积; ω 为输水廊道阀门处的断面面积; α 为系数; t_v 为阀门开启时间; d 为惯性水头。

考虑到第一级蓄水池输水阀门即将慢慢关闭的同时开启第二级蓄水池阀门, 而在第二级蓄水池阀门慢慢关闭的同时打开闸室输水阀门, 继续往闸室灌水^[10]。通过这种开启方式, 可缩短一部分输水时间。故代入数据计算, 船闸充水时间为 10.77 min, 泄水时间为 10.92 min, 均在 8 ~ 12 min 之内, 满足规范要求。

4.3.2 水力曲线

采用水量平衡建立闸室、省水池流量关系, 计算得到水力特性成果见图 4 和图 5。结果表明, 闸室在充(泄)水过程中水位曲线呈三阶梯形上升(下降), 坡度较缓, 水位平均上升(下降)速度较慢; 流量过程线呈现三峰形, 从图中可以看出, 省水船闸前两个流量峰值较小, 水流条件良好, 对闸室内船舶停泊较为有利。

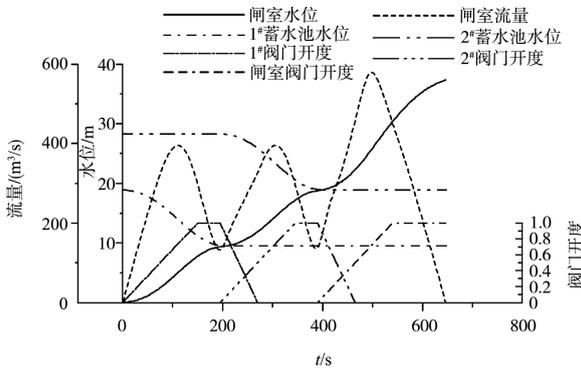


图4 省水船闸充水水力特性曲线

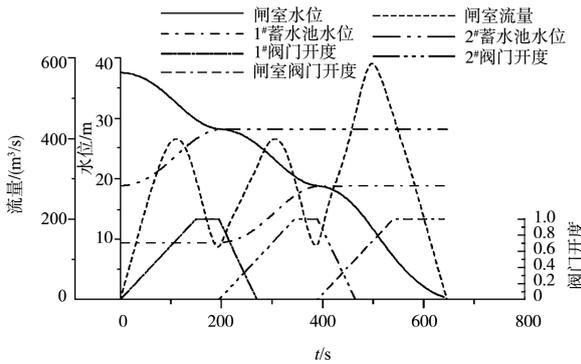


图5 省水船闸泄水水力特性曲线

4.4 省水船闸方案与单级方案比较

通过与大藤峡单级船闸方案相关参数比较(表3),可以看出省水船闸在高坝通航枢纽中具有明显的优势:1)降低阀门工作水头。省水船闸可削减20.125 m工作水头,使阀门最大工作水头降至20 m左右,大幅改善阀门工作条件,有效避

开了技术复杂的阀门水力学问题,降低阀门发生空蚀空化的几率;2)简化输水系统设计。由于船闸工作水头成倍降低,输水系统与消能工的设计和建造大大简化,有条件在原单级方案基础上抬高主廊道与阀门段廊道高程,减少河床开挖,节省工程造价;3)作用水头降低,水流动能相应减弱,闸室内停泊条件优于单级方案。从图4可知,省水船闸方案灌水时,水位上升较缓,平均上升速度较慢,流量呈现三峰形,最大流量为388.97、388.97和560.53 m³/s,前两个峰值流量较单级船闸方案的最大流量542.5 m³/s要小得多,避免了充泄水初期出现较大的波浪力和局部力,从而获得更好的水流条件,有利于闸室船舶的停泊安全;4)第二级省水阀门和主廊道阀门开启速度加快,总输水时间缩短0.23 min。省水船闸开启阀门较多,理论上讲输水时间较长。但是我们在闸室起始水深较小时阀门速度正常开启,第一级省水池水体泄入闸室后,闸室水深增加很多,后面阀门开启时可以加快,这样不仅可以大幅缩短灌泄水时间,而且不会恶化闸室停泊条件;5)节省航运用水。省水船闸方案具备省水效果,在解决高坝枢纽通航问题的同时,兼顾发电与农业灌溉,由此产生的经济和社会效益十分巨大,对建设节水型社会、走可持续发展道路具有重要意义。

表3 大藤峡单级船闸与省水船闸方案水力特性综合比较

方案	阀门工作水头/m	阀门开启时间/min	阀门开启方式	输水时间/min	流量系数
单级船闸方案	40.250	6	均匀连续开启	充水 11.00 泄水 11.40	充水 0.763 泄水 0.660
省水船闸方案	20.125	3/1/1	蓄水池阀门采取1 min快开方式,闸室主廊道阀门初期均匀开启,后期可快速开启	充水 10.77 泄水 10.92	充水 0.686 泄水 0.699

5 结论与展望

限于高水头船闸阀门水力学问题的复杂性,现有技术措施难以保证达到理想效果。本文基于国外省水船闸工作原理,以在建的大藤峡单级船闸工程为例,针对省水船闸形式在高坝通航领域中的应用进行了探讨,得出以下结论:

1) 两级省水船闸方案能够削减20.125 m工作水头,使阀门工作条件得到明显改善,有效地抑制

了阀门空蚀空化,规避技术复杂的阀门水力学问题。

2) 由于工作水头成倍降低,输水系统与消能工的设计和建造均大为简化,与增加的蓄水池及廊道系统的经费相比基本持平,而且闸室的水流条件优于单级船闸方案。

3) 省水船闸可节省航运用水,省水率达到48.76%,航电枢纽后期的运营效益十分可观,有效缓解了航运与发电之间的矛盾。

目前, 省水船闸在我国高坝通航枢纽中还未见应用, 尚处于研究和论证阶段, 但其具有广阔的发展前景, 应得到重视和推广。

参考文献:

[1] 周玉华, 刘锋. 省水船闸初探[J]. 水运工程, 2006(10): 157-159.

[2] 唐铁明. 省水船闸在山区河流渠化中的应用[J]. 广西水利水电, 2010(3): 61-63.

[3] 陈明栋, 杨忠超, 杨斌. 乌江银盘船闸输水系统选型研究[J]. 重庆建筑大学学报, 2006, 28(5): 31-34.

[4] 陈明栋. 带调节水池船闸的水力学初探[J]. 重庆交通大学学报, 1994, 13(4): 61-67.

[5] 王晓青, 刘畅. 省水船闸发展及研究现状[J]. 重庆建筑, 2013(10): 53-54.

[6] 范惠生. 春天湖船闸的特点及设计创新[J]. 水利规划与设计, 2007(3): 53-56.

[7] 王健. 省水船闸水力特性研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2008.

[8] 海显盛. 银盘省水船闸省水池水力特性研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2009.

[9] 陈明栋, 杨斌, 杨忠超, 等. 省水船闸在高坝通航中的应用[J]. 水运工程, 2008(12): 116-118.

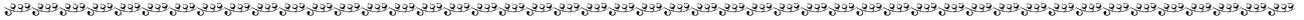
[10] 杨忠超, 杨斌, 陈明栋, 等. 乌江银盘水利枢纽省水船闸运行方式研究[J]. 水运工程, 2009(6): 112-116.

[11] 丛广明, 王春富, 赖蜀东, 等. 大藤峡水利枢纽船闸输水系统设计简介[J]. 东北水利水电, 1997(7): 3-6.

[12] 覃业传, 宣国祥, 麦建清, 等. 大藤峡水利枢纽单级船闸输水系统初步分析[J]. 水利水运工程学报, 2012(4): 72-75.

[13] 杨忠超, 陈明栋. 省水船闸省水效益分析及在内河航运建设中的应用[J]. 水运工程, 2013(12): 132-135.

[14] 杨忠超, 杨斌, 陈明栋, 等. 高水头船闸闸室消能工消能效果实验研究[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2010, 29(3): 461-465. (本文编辑 郭雪珍)



(上接第 38 页)

分析来看, 刚性系数 K 对支座弯矩影响较小, 而对跨中弯矩影响较大, 得到如下公式:

$$\begin{cases} \Delta M = kqL_0^2 \Delta \alpha^{1/3} & (0.5 \text{ 跨}) \\ \Delta M = kqL_0^2 \Delta \alpha^{2/3} & (1 \text{ 跨}) \end{cases} \quad (10)$$

这里的非 0.5 跨即为除 0.5 跨外的跨中处, K 值可通过图 7 查得。

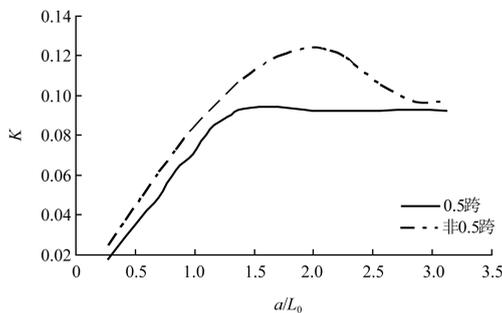


图 7 K 值

这里主要是分析距离均等而间距不大的移动集中力, 相邻集中力间距越大时上述计算误差就会越大。

5 结论

1) 轴向刚性系数 K 对弯矩的影响可利用支座

的相对系数 α 来研究;

2) 对连续梁的弯矩轴向刚性系数 K 主要位于边上的 0~1.5 跨范围内;

3) 在相同的荷载条件下, 悬臂长度越大, 刚性系数 K 对弯矩的影响越小;

4) 跨中、支座弯矩与相对系数 α 的 1/3 或 2/3 次方成线性关系;

5) 本文通过计算找到了不同相对系数 α 对矩形均载下、有无悬臂作用下、梯形荷载下的包络线及移动荷载下的弯矩影响关系, 丰富了高桩码头设计规范, 为设计者计算提供保障。

此外, 由于篇幅的原因, 本文主要针对 ≥ 4 跨的连续梁进行研究, 对于小于 4 跨的连续梁误差较大, 上述关系式不适用。也可以使用本文的方法对其他的荷载分布进行分析研究。

参考文献:

[1] JTS 167-1—2010 高桩码头设计与施工规范[S].

[2] 张华平, 罗文华, 张金华. 支座宽度及相对刚性系数对连续梁弯矩的影响[J]. 重庆交通大学: 自然科学版, 2010, 29(1): 8-10. (本文编辑 武亚庆)