

宽支承轨道梁计算系统的开发及结果分析

张政生 金香花

(丰海技术咨询服务(上海)有限公司, 上海, 200011)

摘要: 介绍基于有限元解法的宽支承轨道梁计算系统的开发, 并对宽支承轨道梁和点支承轨道梁计算结果进行比较和分析。

关键词: 宽支承; 连续梁; 有限元; 计算系统; 开发

轨道梁是高桩梁板式码头上部结构中的重要构件之一, 其主要承受起重机械的轮压作用。轨道梁的计算方法通常是不考虑下部构件的支承宽度, 目前港口工程行业内基于此前提的计算软件, 比较典型并且应用比较广泛的有丰海技术咨询服务(上海)有限公司开发的《GDL 轨道梁计算系统》。该系统由于不能考虑支承宽度, 因此, 市场上对于可以考虑支承宽度的轨道梁计算系统提出了新的需求, 并且随着计算技术和计算理论的发展, 考虑轨道梁的支承宽度在实现方法上也成为可能。

1 点支承轨道梁计算简述

轨道梁的计算原则, 根据支承结构型式不同, 一般按刚性支承连续梁或者弹性支承连续梁计算。支承条件按以下原则确定: 支承于桩帽上的纵梁, 其内力应按弹性连续梁计算; 支承于横梁上的装配整体式纵梁, 具有弹性支承性质, 对于重要工程宜按弹性连续梁计算, 一般工程可简化按刚性支承连续梁计算^[1]。连续梁的计算跨度, 一般取弯矩计算跨度为横梁或桩帽中心距, 剪力计算跨度为轨道梁净距。

上述关于连续梁的计算模式, 实质上是将横梁或桩帽对纵梁的支承简化为一个点(以下简称“点支承”)进行计算, “点支承”连续梁计算图式如图 1 所示。

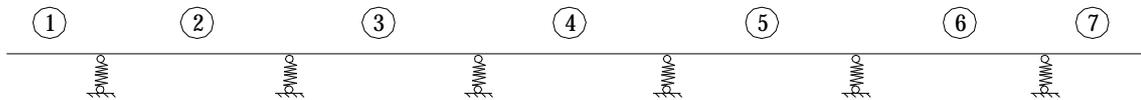


图 1 “点支承”连续梁计算图式

而实际工程中, 支承纵向梁的桩帽或者下横梁的宽度经常都比较宽, 其宽度相对于纵向梁的计算跨度往往是不应该忽略的, 因此, “点支承”轨道梁计算模式理论上就存在缺陷。另外, 将弯矩计算跨度和剪力计算跨度分别取不同的值, 导致计算轨道梁时需要两次取不同计算跨度分别计算梁的弯矩和剪力, 计算比较烦琐。再者, 剪力计算跨度取梁的净跨, 在处理移动轮压荷载的作用时, 存在轮压实际作用位置与在计算跨度上的计算位置的相互对应问题, 使得对于移动荷载的处理也比较复杂。

2 宽支承轨道梁计算模型

下面介绍可以直接考虑支承宽度(以下简称“宽支承”)的轨道梁的有限元解法^[2]。

“宽支承”连续梁的计算模式, 可以将支承宽度范围内的梁简化为弹性地基梁单元, 架空部分的梁按普通梁单元进行计算, 简化后的计算模型即为普通梁和弹性地基梁的组合结构。每一段梁的计算跨度, 弹性地基梁单元取支承宽度, 普通梁单元取轨道梁的净跨。

弹性地基梁的弹性反力系数可近似按支座宽度内均匀分布, 其值的大小可根据支座总弹性反力系数的大小和支承宽度确定, 具体如下:

$$k = \frac{K}{B}$$

式中, K —支座总刚性系数, 单位 kN/m ;

B —轨道梁支承宽度, 单位 m 。

弹性宽支承连续梁支座总刚性系数按下面原则计算: 支承于桩帽上的纵梁, 取其支承处桩

的轴向反力系数；搁置在横梁上的纵梁，取搁置处横梁在单位力作用下的垂直变形值的倒数^[1]。

对于刚性宽支承连续梁，只需要将上式中 K 值取一个比较大的数据（例如 10^{10} 或者更大，但要保证不至于使计算机溢出为原则），其它的处理方法完全同弹性宽支承连续梁。

“宽支承”连续梁计算图式如图 2 所示。



图 2 “宽支承”连续梁计算图式

3 宽支承轨道梁计算系统的开发

3.1 需求分析

作为一个商品化的、使用方便的计算系统，首先要保证计算结果的正确性；此外，软件还必须在数据输入、前处理、后处理等方面要做到操作方便、直观。结合当前高桩码头轨道梁设计的需要，计算系统功能如下：

- ① 针对高桩码头轨道梁设计的需要，完全按照港口工程技术规范开发；
- ② 计算系统能够处理刚性支承和弹性支承条件两种不同的支承特性；
- ③ 不仅能计算“宽支承”连续梁，同时也能按照“点支承”模式计算连续梁；
- ④ 由于轨道梁一般采用预制，安装后再浇筑叠合层形成整体，因此计算系统需要能够按照规范要求，考虑叠合构件施工阶段简支、使用阶段连续两个阶段的效应叠合；
- ⑤ 系统能够进行不同工况下作用效应的组合，并筛选出包络值；
- ⑥ 系统能够根据作用效应包络值进行轨道梁的配筋计算；
- ⑦ 提供中间结果的快速查询功能；
- ⑧ 对于作用效应标准值、包络值，能够绘制其分布图形；
- ⑨ 计算报告书的整理，也是目前设计人员觉得比较烦琐的一件工作，因此计算系统需要能够自动生成条理清楚、图文并茂的计算报告书。

3.2 有限元法求解

“宽支承”连续梁的计算模式确定后，关于弹性地基梁和普通梁的组合结构的有限元解法，是比较简单的问题。

首先，需要对宽支承轨道梁各单元和节点进行编号，编号的原则是自左向右连续编号，同时，每一个单元按照是支座段还是架空段分别对单元类型进行区分，单元类型 1 表示普通梁单元，单元类型 2 表示弹性地基梁单元。

关于单元刚度矩阵推导、总体刚度矩阵形成、等效节点荷载处理、结构内力求解等内容，较多文献中作了比较详细的叙述，此处不再重复。

3.3 后处理

后处理主要包含轨道梁的配筋计算、作用效应的图形表达和计算报告书的生成等内容。

梁的配筋计算，计算上非常成熟，在此不展开叙述。

关于后处理图形输出，可以分计算模型简图、效应标准值、效应包络值三个部分，具体图形生成的方法很多，此处我们可以直接利用 Visual Studio .NET 提供的 Graphi cs 对象实现，此方法的优点是简单方便，图形生成不需要其它支持软件。

计算报告书的生成，过去我们通常采用的方法是输出成 word 格式文档，但这种方法需要 Microsoft Word 的支持，并且伴随着 Office 版本的升级，计算系统也需要同步升级，否则输出计算书时将会出错，这将加大了系统的维护工作量。因此我们将计算书输出成 html 格式，该方法不需要 Office 的支持，可以直接采用 Internet Explorer 打开浏览，直接打印，同时还可以选中、复制、粘贴，转换成 word 文档。

4 结果分析

为验证“宽支承”连续梁计算模型的合理性，下面分别将“宽支承”连续梁和“点支承”连续梁的弯矩、剪力和支座反力进行比较。

模拟算例取门机型号 M_h-6-25 ，支腿纵距 10.5m，支腿轮数 6 个，轮压力 250kN，移动荷载滚动步长 0.1m；码头排架中心距 7.0m，码头分段长度 52m，轨道梁支承宽度（即下横梁宽度）1.5m；轨道梁高度 2.0m，宽度 1.0m；按弹性支承连续梁计算时取支座反力系数 $5.5 \times 10^5 \text{kN/m}$ 。

“宽支承”与“点支承”连续梁的轨道荷载作用效应标准值（弯矩 M 、剪力 Q 、支座反力 R ）计算结果比较详见表 1。

表 1 计算结果对照表

支承类型	“宽支承”连续梁		“点支承”连续梁	
	弹性支承	刚性支承	弹性支承	刚性支承
M_{\max} (kN.m)	1735.907	392.045	1753.341	1307.804
M_{\min} (kN.m)	-773.161	-779.467	-907.994	-1006.556
Q_{\max} (kN)	940.716	956.813	1048.875	1160.113
Q_{\min} (kN)	-940.716	-956.813	-1048.875	-1160.113
R_{\max} (kN)	1270.493	1422.614	1276.009	1413.607
R_{\min} (kN)	-79.383	0	-80.616	-205.796

备注：以上“点支承”连续梁剪力计算跨度没有取轨道梁净跨，仍然按排架中到中距离计算。

“宽支承”与“点支承”连续梁的轨道荷载弯矩标准值分布图见图 3、图 4、图 5、图 6 所示。

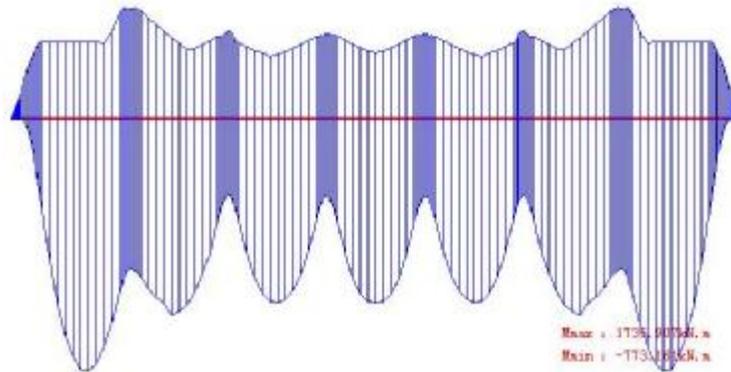


图 3 弹性“宽支承”连续梁弯矩图

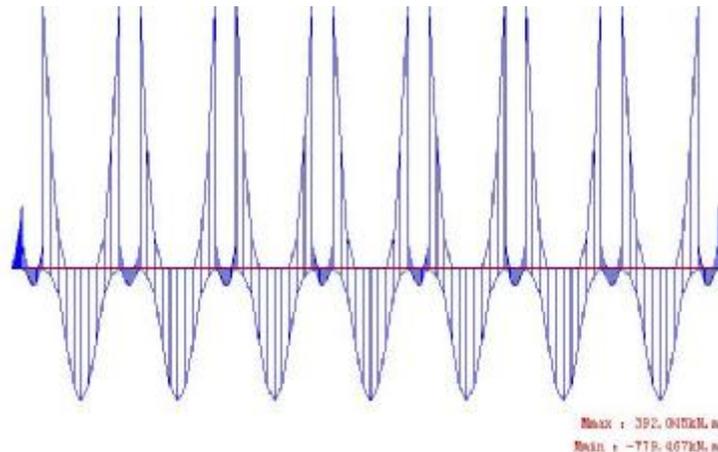


图 4 刚性“宽支承”连续梁弯矩图

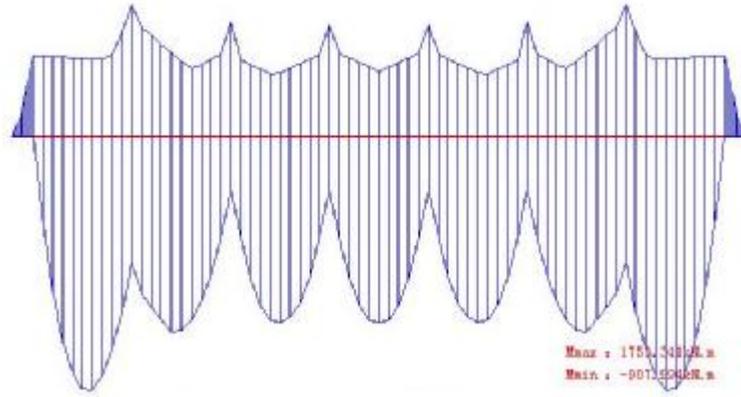


图5 弹性“点支承”连续梁弯矩图

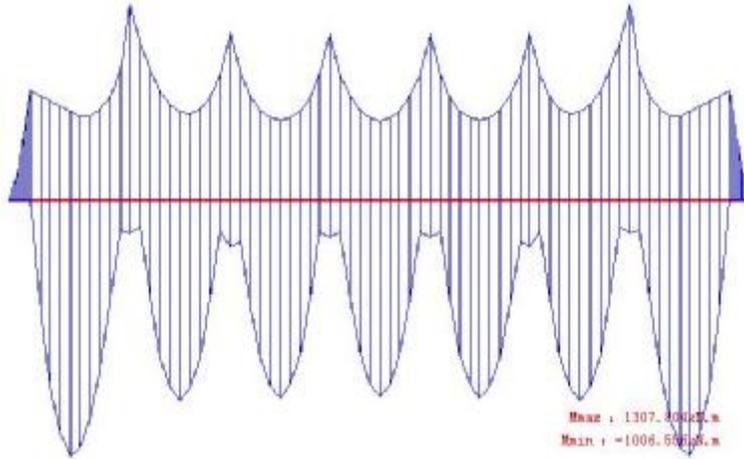


图6 刚性“点支承”连续梁弯矩图

将上述算例中支座宽度增大至 2.5m 后重新计算，比较其计算结果，以确定支座的宽度对弹性支承连续梁的影响。计算结果比较详见表 2。

表 2 支座宽度对计算结果影响对照表

支承类型	弹性点支承 连续梁	弹性宽连续梁 (B / L = 0.214)		弹性宽连续梁 (B / L = 0.357)	
		效应标准值	相对误差	效应标准值	相对误差
Mmax (kN.m)	1753.341	1735.907	-1.00%	1704.279	-2.88%
Mmin (kN.m)	-907.994	-773.161	-17.44%	-731.566	-24.12%
Qmax (kN)	1048.875	940.716	-11.50%	856.98	-22.39%
Qmin (kN)	-1048.875	-940.716	-11.50%	-856.98	-22.39%

“宽支承”连续梁，将弹性和刚性两种不同的支承条件下的计算结果进行比较，不难发现，最大负弯矩计算结果十分接近，但跨中正弯矩在刚性支承条件下比弹性支承条件下大大偏小，相对偏差达到 77.45%；另外，从弯矩分布图上可以看出，刚性支承条件下，支座段的正弯矩和负弯矩值均很小，最大负弯矩发生在架空段的支座边缘处，弯矩图存在较大的突变形状，而弹性支承条件下弯矩图变化则比较平顺。产生这种结果的原因在于，刚性支承条件使支座段按弹性地基梁计算，弹性地基的弹性反力系数取值很大（程序中取 10^{10} ），导致支座处的变形很小，这样处理必然存在较大的误差，并且与梁的实际支承特性也不是很吻合，按刚性支承计算，其计算结果是不可靠性的。

“点支承”连续梁，将弹性和刚性两种不同的支承条件下的计算结果进行比较，总体上，最大负弯矩计算结果，弹性支承比刚性支承结果要小，而最大正弯矩，则刚好相反，弹性支承比刚性支承结果要大。两种支承条件计算结果对比关系的相对差别大小，随着弹性系数与绝对刚性的

接近程度而减小。

当支承条件均为弹性支承时，对“宽支承”和“点支承”连续梁计算结果进行比较，不难发现，除正弯矩外，支座宽度对弹性支承连续梁的计算结果影响较大。总体而言，“宽支承”计算结果比“点支承”计算结果要小，并且随着支承宽度的增大，“宽支承”和“点支承”连续梁计算结果的相对也逐渐增大。

当支承条件均为刚性支承时，对“宽支承”和“点支承”连续梁计算结果进行比较，不难发现，“点支承”连续梁的弯矩、剪力值均比“宽支承”连续梁的要大，而支座反力二者计算结果则比较接近。

通过对以上计算结果的分析，可以得出以下结论：

- ① 采用宽支承连续梁计算模式是比较合理的；
- ② 宽支承连续梁计算模式不必区分弯矩计算跨度和剪力计算跨度，可以减少计算工作量；
- ③ 当支座宽度 B 与轨道梁支座中心距 L 满足 $B/L \leq 0.2$ 时，弹性宽支承与弹性点支承计算结果相差不大，可以近似按点支承计算；随着支座宽度的变大，当 $B/L > 0.2$ 时，弹性宽支承与弹性点支承计算结果相差逐渐变大，有必要按照宽支承轨道梁计算。
- ④ 由于连续梁支承总是具有一定弹性的，轨道梁计算时，最好按照弹性支承计算。否则，当采用刚性宽支承连续梁计算模式时，由于支座支承刚度过大和架空段计算跨度按净跨计算导致梁的跨中弯矩结果严重偏小；而采用刚性点支承连续梁计算模式时，总体上计算负弯矩偏大而正弯矩偏小。

5 改进方向

目前，完全按照港口工程技术规范开发的《KZZ宽支承轨道梁计算系统》，已由笔者所在单位即丰海技术咨询服务（上海）有限公司完成开发，这将会成为港口工程设计人员的又一得力计算工具。

随着现代运输和物流业的发展，船舶及相应码头的建设越来越大型化，预应力技术在码头建设中的应用也越来越广。为提高计算系统的适用范围，今后在考虑预应力轨道梁的计算方面，还有待进一步完善。

参考文献

- [1] 高桩码头设计与施工规范（JTJ291-98）人民交通出版社 1998
- [2] 用宽支座方式计算高桩梁板式码头上的轨道梁 《水运工程》 2003 12