

吊车荷载在PKPM软件中的实现机制

吊车荷载在PKPM软件中的实现机制

徐卫东

中国建筑科学研究院有限公司北京构力科技有限公司 北京 100013

[摘要]移动荷载与吊车荷载是都是工业厂房中重要的荷载，随着工业科技的进步和发展，也对工业厂房提出更高的要求，工程中常常需要诸如抽柱、开大洞、柱距不等、单层多层混合布置、错层等建筑平立面均不规则的厂房结构布局，如何更真实准确的计算吊车荷载对这一类结构产生的影响，成为带吊车工业厂房设计的一个关键点，对于结构布局复杂的工程，以往的二维设计方法已经不能满足实际要求，因此PKPM软件在SATWE模块也提供了吊车荷载计算功能，从而能更好的解决这类复杂工程中的吊车荷载计算问题，对于传统的规则的轻钢或者重钢厂房结构，设计师依然可以在STS模块进行该类问题的计算与出图。

[关键词]吊车荷载；移动荷载；影响线；

1 吊车荷载的导算

在PKPM软件中可以进行吊车荷载的输入，SATWE程序也能准确的根据规范的相应规定计算出吊车荷载产生的作用并参与组合。如下图所示，以一单跨框架为例，局部有抽柱，框架跨度12.5m，柱距6m，抽柱处柱距为12m，吊车选用参数如下：吊车跨度 $L=10.5\text{m}$ ，额定起重量 $Q=10\text{t}$ ，小车重 $g=3.3\text{t}$ ，最大轮压 $P_{\max}=10\text{t}$ ，最小轮压 $P_{\min}=1.25\text{t}$ ，吊车宽度 $B=5.15\text{m}$ ，轮距 4.05m 。大车重记为 G 。

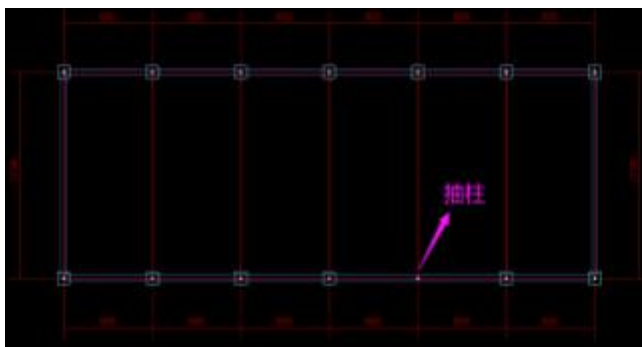


图1局部抽柱框架平面图

在PMCAD中输入两台相同吊车，布置完毕后进行荷载显示如下：

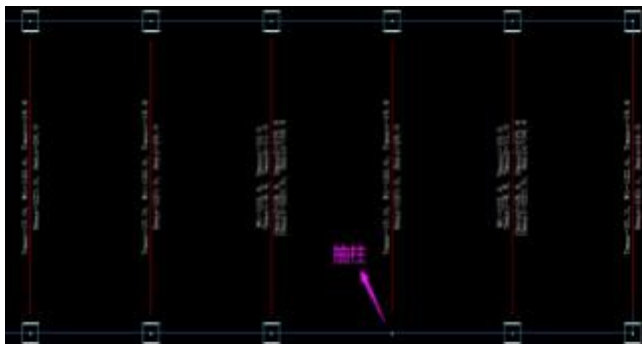


图2吊车荷载显示

对于端跨吊车荷载校核如下：

对于端跨处，程序考虑到相邻两跨存在设缝情况，故在内部计算的时候所用影响线如下图：

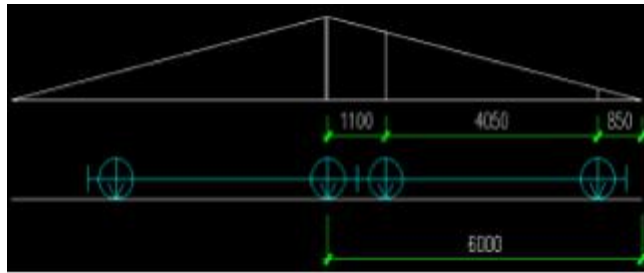


图3柱端跨支座影响线

根据该影响可得端跨支座处的 D_{\max} ， D_{\min} ，

$$\begin{aligned} D_{\max} &= \left(\frac{6}{6} + \frac{4.9}{6} + \frac{0.85}{6} \right) \times P_{\max} \\ &= 1.96 \times 10 \times 9.8 = 192.1 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} D_{\min} &= \left(\frac{6}{6} + \frac{4.9}{6} + \frac{0.85}{6} \right) \times P_{\max} \\ &= 1.96 \times 1.25 \times 9.8 = 24.5 \text{ kN} \end{aligned}$$

再由《荷载规范》6.1.2条：

- 1) 吊车纵向水平荷载标准值，应按作用在一边轨道上所有刹车轮的最大轮压之和的10%采用；该项荷载的作用点位于刹车轮与轨道的接触点，其方向与轨道方向一致。
- 2) 吊车横向水平荷载标准值应取横行小车中梁与额定起重量之和的百分数，并应乘以重力加速度，吊车横向水平荷载标准值的百分数应按表6.1.2采用。

且由《荷载规范》表6.1.2查的，软钩吊车，额定起重量 $\leq 10\text{t}$ 时，百分数应取12%，于是：

作用在轨道一边的纵向水平荷载：

$$T_{\max} = 10 \times 9.8 \times 2 \times 10\% = 19.6 \text{ kN}$$

横向水平荷载总值：

$$T_{\max} = (3.3 + 10) \times 9.8 \times 12\% = 15.6 \text{ kN}$$

作用在每一个轮子的横向水平荷载：

$$T_{\max 1} = 15.6/4 = 3.9kN$$

同样，利用图3中的影响线可得：

$$T_{\max} = 2 \times \left(\frac{6}{6} + \frac{4.9}{6} + \frac{0.85}{6} \right) \times 3.9 = 15.288kN$$

而图2吊车荷载显示中， W_i 表示大车和小车的总重量，即 $W_i = G + g$ 。

$$\text{再由 } 2 \times (P_{\max} + P_{\min}) = W_i + Q$$

所以：

$$\begin{aligned} W_i &= 2 \times (P_{\max} + P_{\min}) - Q \\ &= (2 \times (10 + 1.25) - 10) \times 9.8 = 122.5kN \end{aligned}$$

对于正常 6m 柱距处吊车荷载校核如下：



图4正常柱距影响线吊车排布

根据结构力学可得正常 6m 柱距的支座反力影响线如图3所示，根据该影响线得 D_{\max} ， D_{\min} ，

$$\begin{aligned} D_{\max} &= \left(\frac{1.95}{6} + \frac{6}{6} + \frac{0.85}{6} + \frac{4.9}{6} \right) \times P_{\max} \\ &= 2.283 \times 10 \times 9.8 = 223.734kN \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} D_{\min} &= \left(\frac{1.95}{6} + \frac{6}{6} + \frac{0.85}{6} + \frac{4.9}{6} \right) \times P_{\min} \\ &= 2.283 \times 1.25 \times 9.8 = 28kN \end{aligned}$$

因为作用在轨道一侧刹车轮的最大轮压不变，所以作用在轨道一边的纵向水平荷载：

$$T_{\max} = 10 \times 9.8 \times 2 \times 10\% = 19.6kN$$

作用在每一个轮子的横向水平荷载:

$$T_{\max1} = 15.6/4 = 3.9kN$$

同样，利用图4中的影响线可得:

$$T_{\max} = 2 \times \left(\frac{1.95}{6} + \frac{6}{6} + \frac{0.85}{6} + \frac{4.9}{6} \right) \times 3.9 = 17.8kN \text{ 而吊车的自重是不会变的，即 } W_f = 122.5kN。$$

对于抽柱局部12m柱距处吊车荷载校核如下:

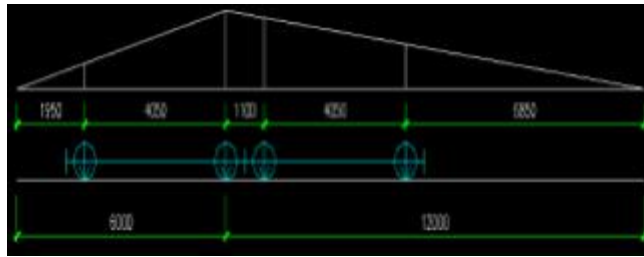


图5抽柱处的支座反力影响

抽柱处的支座反力影响如图5所示。

当最大轮压在抽柱一侧时:

$$\begin{aligned} D_{\max1} &= \left(\frac{1.95}{6} + \frac{6}{6} + \frac{6.85}{12} + \frac{10.9}{12} \right) \times P_{\max} \\ &= 2.804 \times 10 \times 9.8 = 274.792kN \end{aligned}$$

与其对应的另一端:

$$\begin{aligned} D_{\min2} &= \left(\frac{1.95}{6} + \frac{6}{6} + \frac{0.85}{6} + \frac{4.9}{6} \right) \times P_{\min} \\ &= 2.283 \times 1.25 \times 9.8 = 28kN \end{aligned}$$

当最大轮压在未抽柱一侧时:

$$\begin{aligned} D_{\max2} &= \left(\frac{1.95}{6} + \frac{6}{6} + \frac{0.85}{6} + \frac{4.9}{6} \right) \times P_{\max} \\ &= 2.283 \times 10 \times 9.8 = 223.734kN \end{aligned}$$

$$D_{\min 1} = \left(\frac{1.95}{6} + \frac{6}{6} + \frac{6.85}{12} + \frac{10.9}{12} \right) \times P_{\min}$$

$$= 2.804 \times 1.25 \times 9.8 = 34.35 \text{ kN}$$

因为作用在每一个轮子上的横向水平荷载： $T_{\max 1} = 15.6/4 = 3.9 \text{ kN}$ ，且小车横向水平荷载可均分两侧，分别按照两侧的支座影响线分别计算，故：

抽柱一侧：

$$T_{\max} = \left(\frac{1.95}{6} + \frac{6}{6} + \frac{6.85}{12} + \frac{6.9}{12} \right) \times 3.9 = 11 \text{ kN}$$

未抽柱一侧：

$$T_{\max} = \left(\frac{1.95}{6} + \frac{6}{6} + \frac{0.85}{6} + \frac{4.9}{6} \right) \times 3.9 = 8.9 \text{ kN}$$

该种情况下，大车与小车的总重 $W_t = 122.6 \text{ kN}$ 不变，因为作用在轨道一侧刹车轮的最大轮压不变，所以纵向水平荷载 $T_{\max, z} = 19.6 \text{ kN}$ 也不变。

由以上校核数据可以看出，PKPM程序可以正确处理端跨、中跨及存在抽柱等情况的吊车荷载。

对多台吊车组合时的吊车荷载的计算，依据《荷载规范》6.2.1条，当厂房某跨有两台以上吊车，此跨吊车荷载应该按照起重量较大的两台吊车作用计算，同时依据该条规定，考虑多台吊车竖向荷载，最多考虑4台组合，考虑多台吊车水平荷载时，对单跨或多跨厂房的每个排架最多为2台组合。因此软件对于布置了多跨吊车的厂房，竖向荷载仅考虑两跨之间组合，相当于考虑了4台吊车的组合；水平荷载只考虑一跨作用，两跨之间不组合，相当于考虑了2台吊车荷载的组合。

对于考虑多台吊车组合时，也要注意《荷载规范》6.2.2条所规定的折减系数是需要设计师在吊车平面布置时输入的，如图6所示。

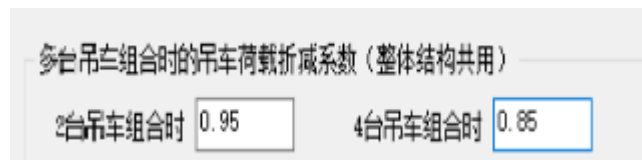


图6多台吊车组合折减系数

对于吊车荷载在输入的时候也需要换算下吊车荷载的作用位置，如图7所示，与网格线偏心值决定吊车竖向荷载与下柱形心的位置，横向水平荷载到牛腿的距离决定吊车横向水平荷载做为柱间荷载作用在上柱的位置。

吊车工作区域参数输入 (当前楼层)

与第一排吊钩线的偏心(mm)	750	吊车台数	2
与第二排吊钩线的偏心(mm)	750	第一台吊车序号	1
水平力到牛腿顶面的距离(mm)	900	第二台吊车序号	1

图7吊车荷载作用位置

2 吊车荷载的处理

吊车荷载作用在吊车柱的牛腿上，牛腿顶面将排架柱分为下柱和上柱，柱的上下端两个截面内力控制柱的配筋，所以在以前老版本的PKPM软件中需要在牛腿顶面处设置一个单独的结构标准层，而在新版本PKPM软件中不需要再单独建立一个标准层，只需输入相应的相对于当前楼层的层顶标高，如图8所示，注意该标高处一定要有相应的层间梁。

考虑空间工作和扭转影响的效应调整系数E1	1	注：应根据吊车资料列表中勾选的吊车序号确定。
吊车荷载引起的地震剪力和弯矩增大系数E2	1	
相对于当前楼层顶面的标高 (mm)	0	

图8吊车的标高

对于布置完吊车荷载后，进入SATWE程序中，可以在SATWE参数对话框中的工况信息中看到生成的吊车荷载工况且同时在组合信息中看到参与荷载组合的吊车工况，该工况程序中记为CRN工况，分别如下图9、图10所示。

编号	工况名称	工况属性	参与计算	分项系数	排
1	满荷载	--	是	1.50	
2	风荷载	--	是	1.50	
3	吊车荷载	--	是	1.50	
4	水压力	--	是	1.50	

图9吊车荷载工况

组合编号	组合表达式
135.	1.30*DL + 1.50*CRN
136.	1.00*DL + 1.50*CRN
137.	1.30*DL + 1.50*LL + 1.05*CRN
138.	1.30*DL + 1.50*LL2 + 1.05*CRN
139.	1.30*DL + 1.50*LL3 + 1.05*CRN
140.	1.30*DL + 1.05*LL + 1.50*CRN
141.	1.30*DL + 1.05*LL2 + 1.50*CRN
142.	1.30*DL + 1.05*LL3 + 1.50*CRN
143.	1.00*DL + 1.50*LL + 1.05*CRN
144.	1.00*DL + 1.50*LL2 + 1.05*CRN
145.	1.00*DL + 1.50*LL3 + 1.05*CRN
146.	1.00*DL + 1.05*LL + 1.50*CRN

图10吊车组合信息

已布置吊车荷载的结构，SATWE程序中在计算地震作用时质量中并没有包含吊车桥架重量或硬钩吊车悬吊物的重量，而《抗规》5.4.1条规定如下：

5.4.1 结构构件的地震作用效应和其他荷载效应的基本组合，应按下式计算：

$$S = \gamma_G S_{Gk} + \gamma_{10} S_{10k} + \gamma_{20} S_{20k} + \psi_E \gamma_W S_{Wk} \quad (5.4.1)$$

式中：S——结构构件内力组合的设计值，包括组合的弯矩、轴向力和剪力设计值等；

γ_G ——重力荷载分项系数，一般情况下应采用1.2，当重力荷载效应对构件承载力有利时，不应大于1.0；

γ_{10} 、 γ_{20} ——分别为水平、竖向地震作用分项系数，应按表5.4.1采用；

γ_W ——风荷载分项系数，应采用1.4；

S_{Gk} ——重力荷载代表值的效应，可按本规范第5.1.3条采用，但有吊车时，尚应包括悬吊物重力标准值的效应；

图11抗规条文5.4.1

所以用户如果需要考虑这部分质量的影响，可以在SATWE前处理及计算中的特殊节点菜单下的附加质量选项，如图9所示，将吊车桥架重及硬钩吊车的吊重输入到相应的节点处，程序在计算地震作用时可以考虑这部分质量对地震作用的影响。如果用户需要考虑桥架位于多个位置时对整体结构的影响，可以建立几个模型，分别在几个位置布置桥架的附加质量，然后进行对比计算，得到一个合理的设计结果。

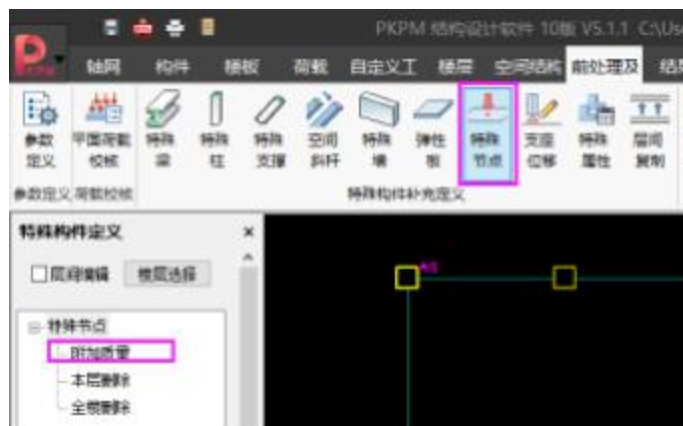


图12附加质量定义

SATWE程序自动会对每一对加载点施加4组外力，分别为左点最大轮压、右点最小轮压；右点最大轮压，左点最小轮压；左、右正横向水平刹车力（左、右节点各作用一半横向水平刹车力）；左、右正纵向水平刹车力（左、右节点各作用一半纵向水平刹车力）。对于负方向的横向水平刹车力及纵向水平刹车力，程序自动取相应正方向的负值。

以上的每组吊车的每一次加载下的4次吊车作用，SATWE程序都分别作为一种荷载工况，在每一组荷载工况下，求出每根杆件的内力。例如，某工程在两个跨上布置了2组吊车，假设每一跨上有10对加载节点。由于程序要对每一对加载节点分别作用4组外力，则该工程的吊车荷载计算的工况数为： $2 \times 10 \times 4 = 80$ 个，由此可以看出，吊车荷载下计算的荷载工况数量是非常多的，在多跨布置吊车荷载时的组合更多更复杂。如果用每一个吊车荷载工况去和其他荷载效应组合，如和恒载、活载、风载、地震作用荷载等去组合，则组合的过程将非常复杂，计算效率也很低。因此PKPM程序中对吊车荷载采用了预组合的计算方式，吊车荷载预组合以后，再和其他荷载如恒载、活载、风载、地震作用荷载等进行组合。

对于柱，其预组合目标是轴力最大，轴力最小，弯矩最大，弯矩最小，剪力最大。对于梁，其预组合目标是各个截面弯矩最大，弯矩最小。

3 计算结果的查看

程序计算完后，SATWE后处理中输出了吊车荷载下的预组合内力简图及预组合内力文本文件，简图的查看在结果下有个吊车预组合，如下图13所示，可进行梁构件及柱构件的吊车预组合内力查看。



图13吊车预组合

根据《抗震规范》要求，在考虑了地震作用的组合中不用考虑吊车的水平荷载，因此，程序自动计算出了两种预组合，即“轮压”内力组合、“轮压+制动力”内力组合，如图14所示，前者用于有震组合，后者用于无震组合。



图14吊车的两种预组合

按照《荷载规范》规定，在多跨上作用的吊车荷载时，应考虑最多两跨吊车荷载的组合。当布置了多组吊车荷载，程序在作吊车荷载的预组合时，对于每一个杆件的预组合内力，将自动考虑两跨吊车荷载同时作用的情况找出最不利数值。计算了两跨吊车时将乘上用户输入的 4 台吊车作用的组合系数。当布置的吊车组数多于两跨或两组时，程序按照最不利布置的两跨找出预组合内力。

文本的查看，如图15所示，预组合文本文件中，程序分别输出预组合“轮压+制动力”及“轮压”两类组合的内力包络值。对于柱分别输出柱顶、柱底两个控制截面，如图16所示。对于梁构件均同柱构件做相应的查询。

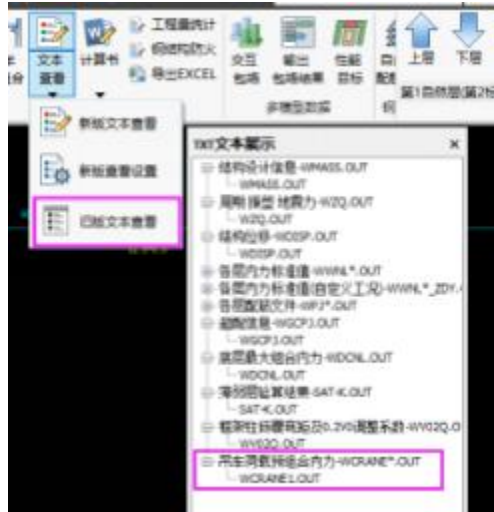


图15吊车预组合文本查看

节点号	轴力	弯矩	剪力	双向弯矩	双向弯矩	双向弯矩	双向弯矩	双向弯矩
11	490.8	1.7	7.0	-27.7	4.9	59.1	11.1	Ymax
13	-424.1	-6.8	7.9	-28.3	-2.1	-37.8	-4.3	Ymax
33	-0.1	6.0	0.0	0.8	8.2	0.0	0.0	Xmax
43	-423.1	-6.5	7.2	-28.2	-2.1	-37.6	-4.3	Xmax
53	-2.7	1.0	0.6	-2.4	4.3	-4.8	7.9	Xmax
63	-496.8	-1.3	7.0	-27.7	-4.9	-59.1	-11.2	Xmax
73	-496.8	-1.3	7.0	-27.7	-4.9	-59.1	-11.2	Xmax
83	-496.8	-1.3	7.0	-27.7	-4.9	-59.1	-11.2	Xmax
93	-496.8	-1.3	7.0	-27.7	-4.9	-59.1	-11.2	Xmax
111	1.8	-6.1	0.0	-0.2	-6.1	-0.4	-0.7	Xmin
123	1.8	-6.1	0.0	-0.2	-6.1	-0.4	-0.7	Xmin
133	1.8	-6.1	0.0	-0.2	-6.1	-0.4	-0.7	Xmin
143	1.8	-6.1	0.0	-0.2	-6.1	-0.4	-0.7	Xmin

图16柱构件吊车预组合信息

同时也可在梁、柱构件信息中也可以到相应的吊车预组合工况（CRN工况），如图17所示，在构件信息中同时可以看到该工况参与相应的荷载组合，如图18所示。

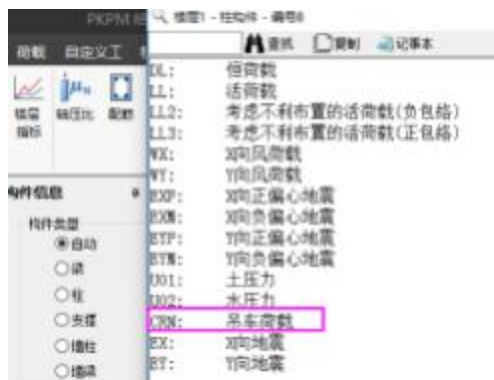


图17构件信息

编号	基本组合系数											
	L1	L2	L3	L4	W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7	W8
168	1.30	0.90	0.90	1.30	0.00	-0.90	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
169	1.30	1.35	0.90	0.90	1.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
170	1.30	0.90	1.35	0.90	1.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
171	1.30	0.90	0.90	1.35	1.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
172	1.30	1.35	0.90	0.90	-1.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
173	1.30	0.90	1.35	0.90	-1.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
174	1.30	0.90	0.90	1.35	-1.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
175	1.30	1.35	0.90	0.90	0.00	1.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
176	1.30	0.90	1.35	0.90	0.00	1.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
177	1.30	0.90	0.90	1.35	0.00	1.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
178	1.30	1.35	0.90	0.90	0.00	-1.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
179	1.30	0.90	1.35	0.90	0.00	-1.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
180	1.30	0.90	0.90	1.35	0.00	-1.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
181	1.30	1.35	0.90	0.90	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
182	1.30	0.90	1.35	0.90	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

图18吊车荷载的组合

4 移动荷载

以上着重介绍了工程中常见的双轨吊车荷载在程序中的处理，但是在实际的工程中还会经常遇到这种单轨吊车的作用，如下图所示。



图19单轨移动荷载

针对这种单轨道的电动葫芦荷载，PKPM程序中也提供了相应的移动荷载来进行布置模拟，如图20所示。

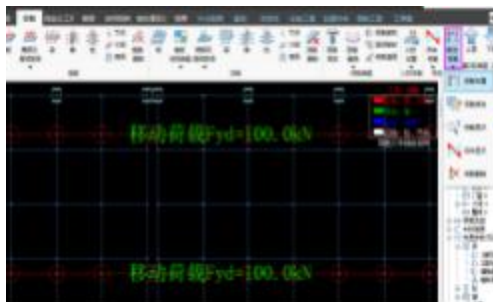


图20移动荷载布置

移动荷载的定义是输入竖向集中力值，一般而言水平荷载较小，可不考虑，对于移动荷载的布置，PMCAD 提供“直线选择”和“逐点选择”两种移动荷载布置方式。“直线选择”只需指定移动轨迹线的起点和终点，程序自动搜索处在轨迹线上的节点，并生成作用在这些节点上的移动荷载。“逐点选择”需要用户逐点指定移动荷载经过的节点，并生成作用在节点上的移动荷载，该布置方式的移动轨迹线可不为直线，且可避开轨迹线上不作用移动荷载的节点。

移动荷载的竖向力和吊车荷载同样，不参与地震作用质量的计算。如用户需要考虑，可在 SATWE前处理中输入节点附加质量，操作方式同吊车荷载。

对每组移动荷载，SATWE 自动对每一个加载节点加载移动荷载作用，即在加载节点处作用一个竖向集中力。软件按照与计算吊车荷载类似的流程计算移动荷载，并进行内力预组合，对于后处理查看的方式同吊车荷载，工况名称也为CRN。

5 总结

本文主要介绍了吊车荷载与移动荷载在SATWE模块中的处理方式，同时详细给出了程序对于吊车荷载的导算过程及对于吊车荷载计算完后如何进行后处理的查看，而很多设计师使用PKPM软件中不知道吊车荷载如何布置，或者对于已布置的吊车荷载根本不知道程序是如何处理的，平时答疑过程中经常会接到用户对于对已布置吊车荷载的工程案例，计算完后总是找不到荷载查看的地方，所以针对这些情况汇总了吊车荷载在PKPM软件中的实现方式，分享给大家。

参考文献

- [1] SATWE多层及高层建筑结构空间有限元分析与设计软用户手册.
- [2] PMSAP复杂多、高层建筑结构分析与设计软件用户手册.