

钢—混凝土组合脊骨梁中大悬臂挑梁荷载分布的空间有限元分析及简化计算研究

张 阳, 邵旭东, 昌 颖

(湖南大学土木工程学院 长沙市 410082)

摘 要: 首先采用空间有限元方法, 对长沙市洪山大桥的钢—混凝土组合脊骨主梁中大悬臂钢挑梁间的荷载分布规律进行了计算分析, 并探讨了荷载作用位置对挑梁荷载分布的影响, 得出钢挑梁荷载分布可以采用 3 片梁分析模型进行计算的结论; 然后提出了考虑挑梁刚度沿其纵向变化和混凝土行车道板受钢箱梁约束程度影响的弹性支承连续梁平面简化算法来分析挑梁间的荷载分布, 并将沿横桥向布置的多排车轮荷载用一个等效集中荷载代替。对比分析表明平面简化算法具有较高的精度, 简单可行。

关键词: 组合结构; 脊骨梁; 荷载分布; 有限元法; 弹性支承连续梁; 等效荷载

1 洪山大桥概况

长沙市洪山大桥是一座主跨为 206 m 的竖琴式无背索斜塔斜拉桥, 索塔水平倾角 58° , 行车道以上塔高约 138.3 m; 斜拉索为竖琴式平行索面结构, 其水平倾角 25° , 全桥共 13 对索; 主跨端部设 30 m 长预应力混凝土箱梁的辅助孔, 其结构布置如图 1 所示。大桥主梁采用钢—混凝土组合脊骨梁结构(以下简称脊骨梁), 脊骨梁的脊梁是一条宽 7 m、高 4.4 m、顶部两侧设 $0.7\text{ m} \times 0.7\text{ m}$ 倒角的矩形闭口钢箱梁; 在钢箱梁的两侧顺桥向每隔 4 m 挑出一对长 13 m 的箱形变截面悬臂钢挑梁, 每对挑梁的顶板贯穿钢箱梁互相连接, 底板与钢箱梁底板对接; 挑梁上装配 21 cm 厚的钢筋混凝土行车道板, 行车道板与钢挑

梁通过剪力钉连接成为组合桥面板, 人行道设置于钢箱梁顶板上。脊骨主梁的构造如图 2 所示。

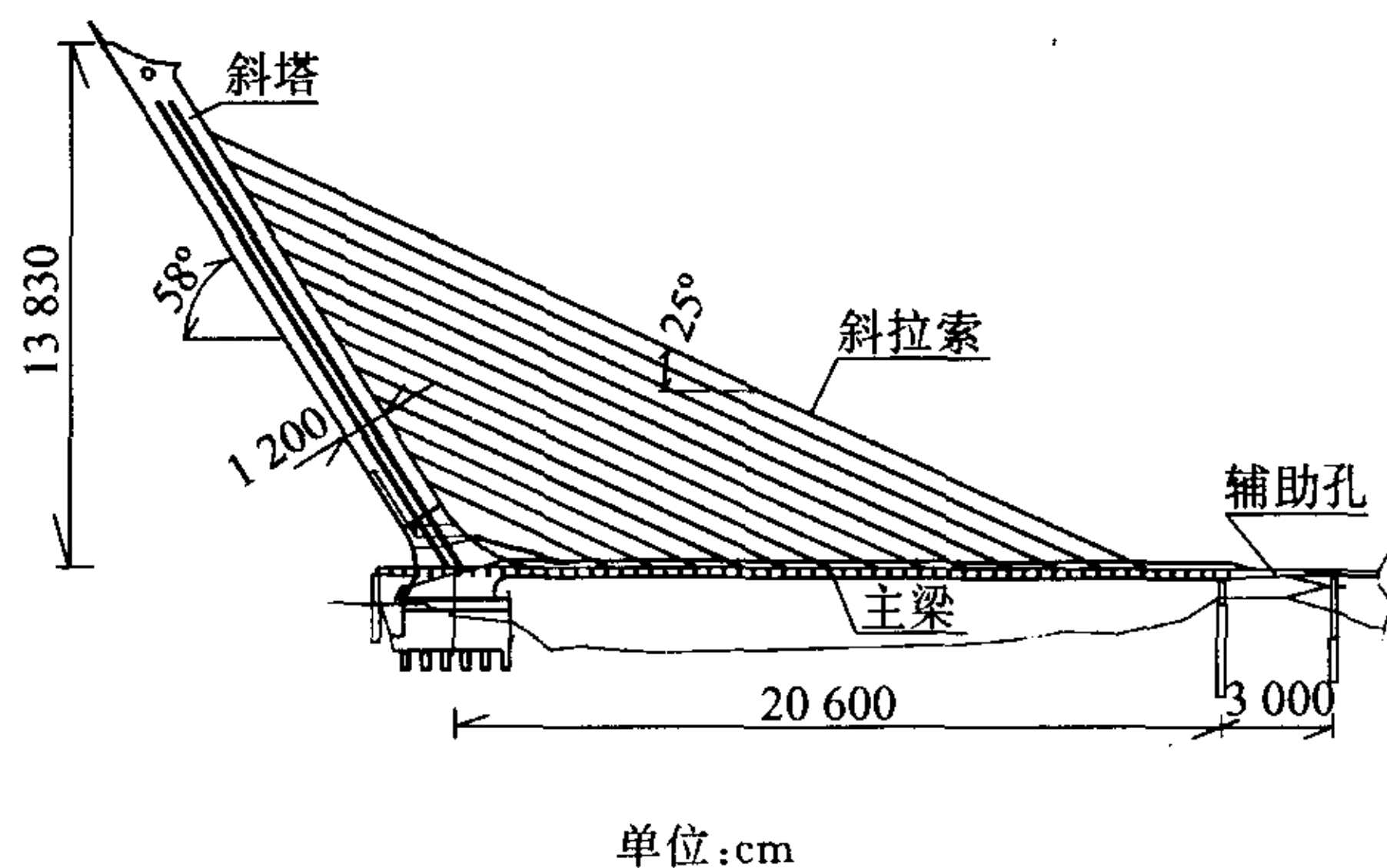


图1 长沙洪山大桥结构布置

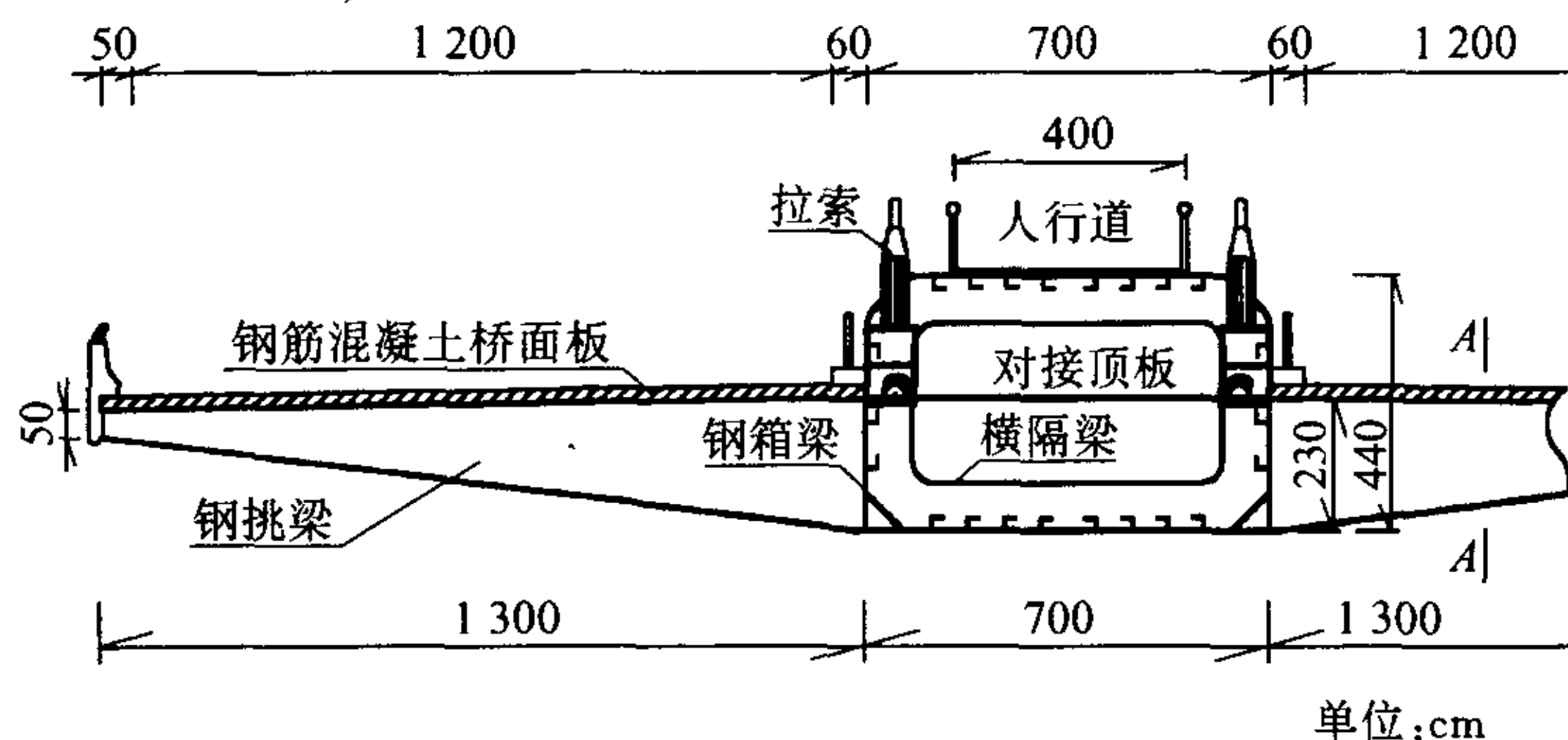


图2 钢—混凝土脊骨主梁构造

大悬臂钢—混凝土组合脊骨梁是一种新型组合结构, 它将承重结构和传力结构有效地结合起来, 使

各部件共同受力, 从而提高了截面效率和整体受力性能。荷载在脊骨梁纵向邻近范围内各钢挑梁间的

分配情况是此类结构设计的重要问题之一。本桥大悬臂组合桥面板结构与一般箱形截面梁上悬臂板的最大不同点是:它每隔 4 m 设置了一道变高度的悬臂加劲钢挑梁,因此就不能按照现行《桥规》关于悬臂板有效分布宽度的公式来确定此组合桥面板的截面内力。这是因为车轮荷载作用在一片悬臂挑梁上时,与其两侧毗邻的若干片钢挑梁也将参与共同受力(即荷载的纵桥向分布),并且荷载愈靠近悬臂的自由端,受载悬臂挑梁所分配的荷载比例愈小,反之分配系数愈大。为了解决这个问题,本文首先采用空间有限元法对钢挑梁的荷载分布进行了计算,同时出于实用的目的,提出了考虑挑梁刚度变化和混凝土行车道板受钢箱梁约束程度影响的弹性支承连续梁平面简化算法来分析荷载分布。两种方法结果吻合较好,可供设计人员参考。

2 荷载分布的空间有限元计算

从空间看,在桥跨范围内组合桥面板是由多排钢—混凝土叠合梁构成的,荷载作用于桥面板的某一悬臂钢挑梁处时,在桥纵向邻近范围内的钢挑梁

均参与受力。考虑到离受载梁较远的挑梁可能不承担荷载的分配,荷载分布计算模型可以简化为 3 片梁和 5 片梁模型。此外,还考虑到荷载作用位置的变化对钢挑梁荷载分布会有较大的影响。利用有限元进行计算时,由于钢箱梁对于组合桥面板来说刚度很大,而且受到斜拉索的多点支承,在使用荷载作用下的竖向变形、扭转与畸变变形都很小,故可不考虑钢箱梁变形对组合桥面板横向内力的影响,即可以认为挑梁和混凝土行车道板的悬臂根部是固结的;在空间有限元分析模型中,钢挑梁和混凝土行车道板均采用壳单元来模拟,钢挑梁与混凝土桥面板之间为完全剪力连接,计算时,忽略了交界面滑移作用的影响。

计算分析时,根据各挑梁固端的弯矩、剪力以及荷载作用点处挑梁的竖向位移值,分别计算挑梁的荷载分布系数,将对应的 3 种分布系数取平均即为钢挑梁的荷载分布系数计算结果,见表 1。另外,还考虑了荷载作用位置变化对荷载分布系数的影响,将荷载沿挑梁纵向作用在不同位置,其受载梁的荷载分布系数变化趋势如图 3 所示。

表 1 钢挑梁荷载分布系数计算结果

荷载距挑梁自由端距离/m		0	1	3	5	7	9	11
3 梁模型	受载梁	0.568 7	0.578 4	0.616 6	0.671 7	0.741 4	0.819 2	0.933 2
	边梁	0.215 6	0.210 8	0.191 7	0.164 1	0.129 3	0.090 4	0.033 4
5 梁模型	受载梁	0.544 2	0.554 5	0.595 4	0.653 9	0.728 2	0.815 4	0.907 0
	相邻梁	0.224 1	0.219 1	0.200 4	0.173 3	0.138 1	0.095 7	0.049 5
	边梁	0.003 8	0.003 6	0.001 9	-0.002	-0.002 2	-0.003 4	-0.003
受载梁分布系数误差/%		4.3	4.1	3.4	2.6	1.9	0.5	2.8

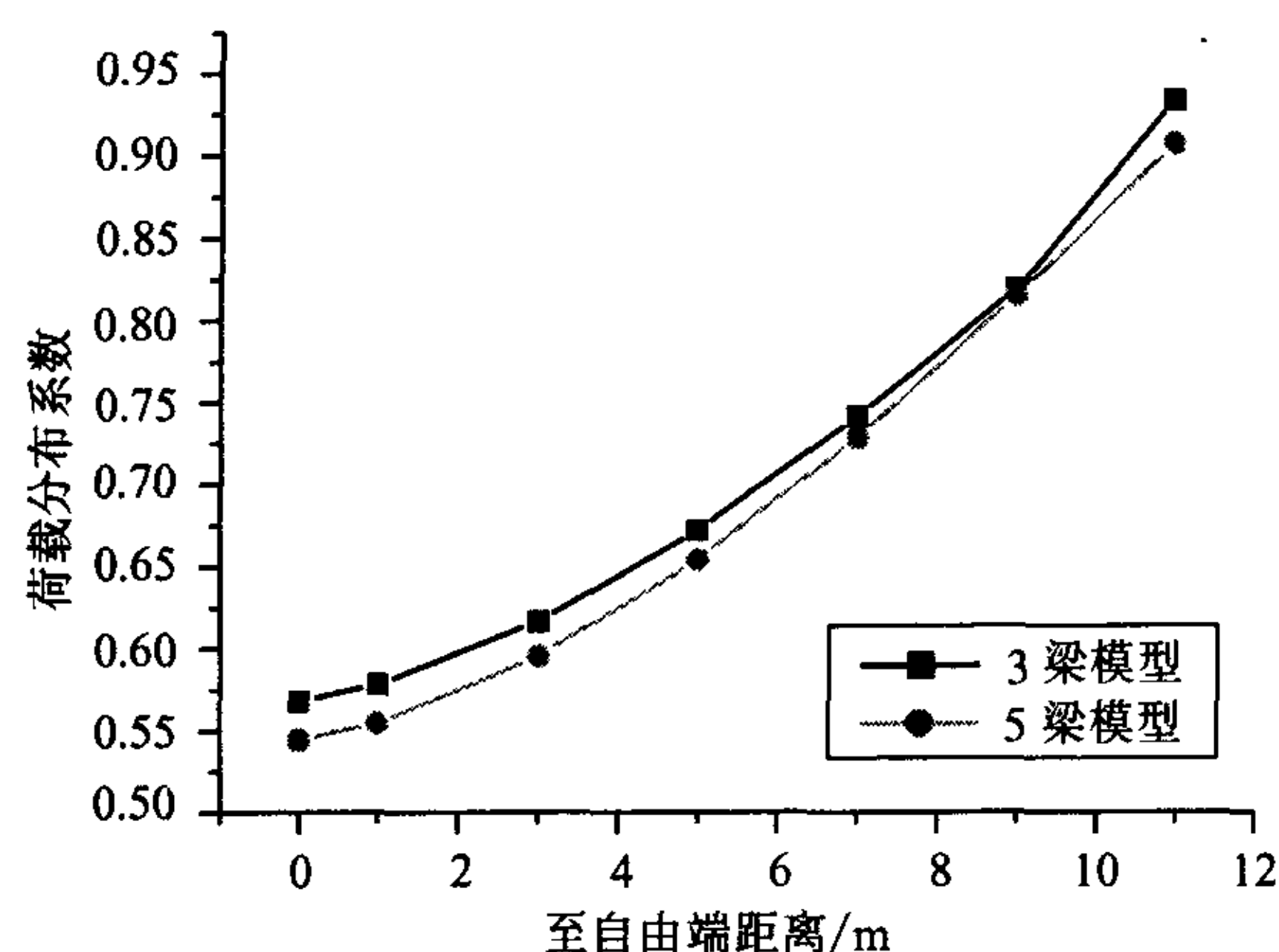


图 3 荷载作用位置变化对横向分布的影响

从表 1 中可以看出,3 片梁与 5 片梁的分析模型计算结果最大相差 4.3%,5 片梁中的边梁几乎不承

担荷载,作用在任一根挑梁上的荷载只对相邻挑梁有较大影响,而对相邻第 2 根挑梁的影响甚微,故实际计算时取 3 片梁计算模型具有足够的精度。另外,从图 3 中可看出,在钢挑梁悬臂根部附近加载时,加载梁分配荷载比例为 90% 左右;而在钢挑梁自由端加载时,加载梁分配荷载比例约为 55%。可见荷载位置愈靠近钢挑梁的固端,受载梁所承担的荷载比例愈大,而相邻挑梁的承载贡献愈小。

3 荷载分布的简化计算

对于荷载在组合梁钢梁间的分配问题,现行的研究主要以等截面的简支梁和连续梁为主,很少涉及变截面悬臂挑梁并排支承混凝土行车道板的形式。钢挑梁的截面刚度随悬臂跨度而变化,精确的理

论分析较为复杂;采用空间有限元方法分析这种结构钢挑梁间荷载分布规律需要大型的有限元通用软件,操作起来很繁琐,也不便于工程设计人员对结构进行初步设计和估算。出于实用的目的,本文提出了挑梁荷载分布的平面简化算法,其基本的出发点是将大悬臂组合桥面板这一空间结构,通过合理的简化,转换为具有弹性支承的平面连续梁结构来计算,这样就可以大大简化结构分析计算的工作量,便于工程实践。

3.1 弹性支承连续梁模型

根据组合桥面板的结构特点,计算时悬臂根部按固结处理,并假定钢挑梁和钢筋混凝土行车道板为弹性材料。很明显,钢挑梁间的荷载分配比例与荷载作用位置、挑梁的截面刚度、混凝土弹性模量、行车道板厚度以及混凝土行车道板受钢箱梁的约束程度等参数有关。根据空间有限元计算结果,钢挑梁的荷载分布计算可采用3梁模型,其平面弹性支承连续梁简化计算模式如图4所示。计算时将荷载作用点处混凝土行车道板简化成平面混凝土梁,梁高取为荷载作用点处混凝土行车道板的厚度 h_c ,梁的截面宽度为荷载作用点处混凝土行车道板的等效分布宽度;荷载作用点处钢挑梁截面对行车道板的支承作用简化为混凝土梁的弹性支承,荷载通过其下弹簧的压缩变形和混凝土梁传递到相邻弹簧,这样就将空间结构简化为平面问题来计算。

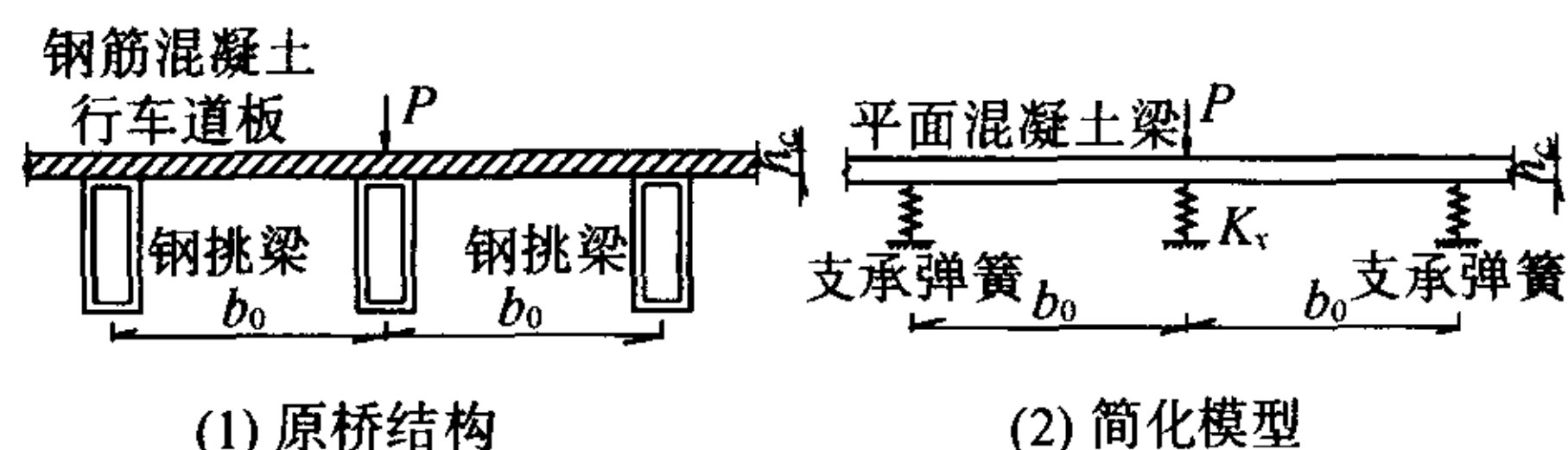


图4 平面弹性支承连续梁简化计算模型

3.2 支承弹簧刚度 k_x 的确定

采用平面简化模型计算时,应该注意的是钢挑梁为变截面悬臂梁,沿梁纵向各截面的刚度是变化的。因此,图5中支承弹簧刚度的取值与荷载作用在钢挑梁的位置有关,可近似地用下面公式计算:

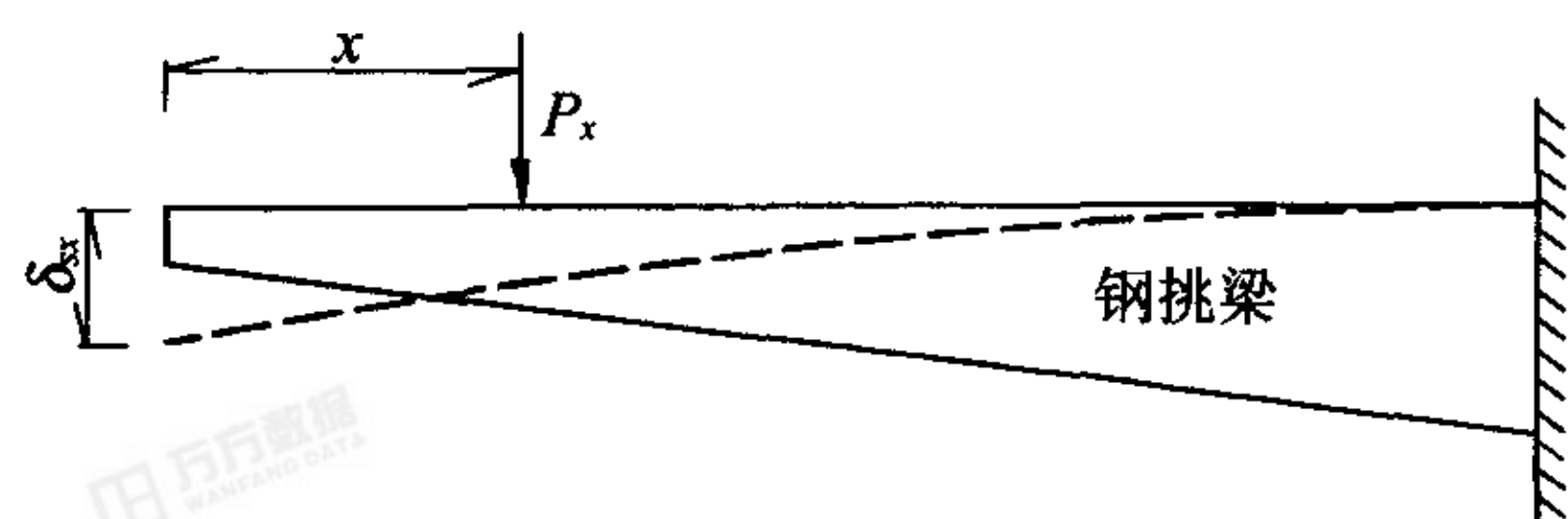


图5 弹簧刚度计算示意

$$K_x = P_x / \delta_{sx} \quad (1)$$

在图5中: x 为荷载作用点距悬臂自由端的距离; K_x 为支承弹簧的刚度; P_x 为受载梁上作用荷载的大小; δ_{sx} 为荷载作用在距悬臂自由端时挑梁自由端的竖向位移,其值可以很方便地利用平面杆系有限元程序算出,用式(1)算出的支承弹簧刚度,反映了钢挑梁不同截面的刚度变化。

3.3 钢筋混凝土行车道板等效宽度 b_i

在图4所示的平面简化计算模型中,决定钢挑梁间荷载分布系数的另一个主要因素是平面混凝土梁的刚度,当混凝土梁弹性模量和混凝土梁的高度一定时,其刚度主要是由梁的等效截面宽度,即荷载作用点处混凝土行车道板沿挑梁纵向的等效分布宽度决定的。考虑到当竖向荷载逐渐向悬臂根部靠近时,荷载作用点处混凝土行车道板受钢箱梁的约束作用也会增大,因此平面梁的等效截面宽度可按如下方法确定。

(1)当荷载作用于挑梁悬臂自由端时,等效截面宽度按我国《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTGD62-2004)的方法来计算,即认为平面梁的等效截面宽度为从荷载作用点开始在平面上按 45° 角扩散相邻挑梁后的宽度,即为挑梁间距 b_0 。

(2)当荷载作用于挑梁其他位置时,平面梁的等效截面宽度以 b_0 为基础进行换算,换算方法如下:

$$b_i = \alpha_i b_0 \quad (2)$$

$$\alpha_i = \sqrt{\delta_{ci} / \delta_{c0}} \quad (3)$$

式中: b_i 为平面梁的等效截面宽度; b_0 为挑梁间距; α_i 为考虑了钢箱梁对混凝土行车道板约束作用的平面梁等效截面宽度放大系数,它反映了钢箱梁对混凝土行车道板变形的约束程度; δ_{c0} 、 δ_{ci} 为忽略钢挑梁的支承作用,将挑梁间 b_0 范围内的混凝土行车道板视为纵向悬臂梁(其固定端为混凝土板与钢箱梁的连接处)时,荷载分别作用在混凝土悬臂梁自由端和其他位置时的自由端竖向位移,如图6所示。

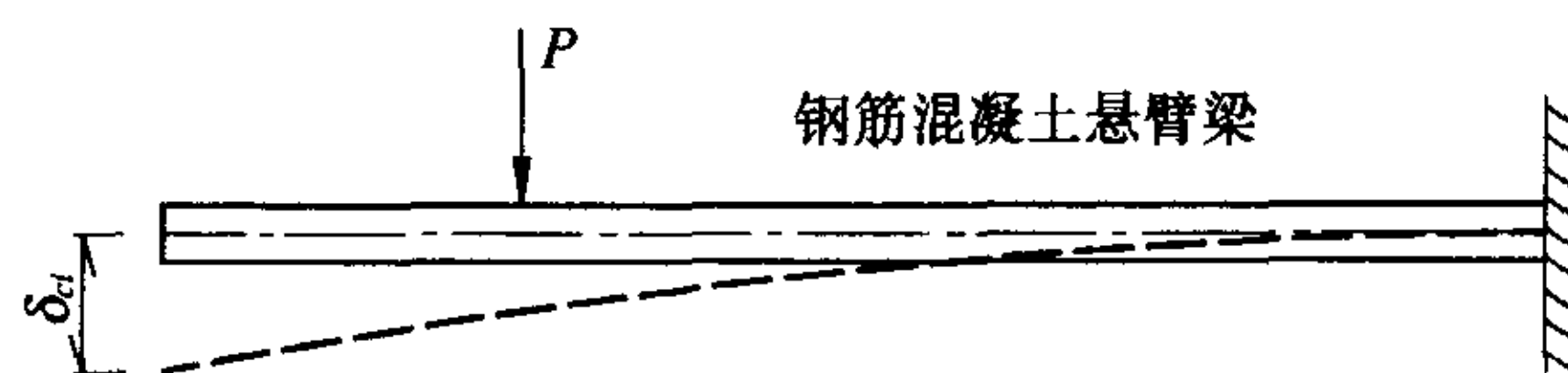


图6 δ_{ci} 示意

支承弹簧刚度与平面梁的等效截面宽度计算时,分别考虑了钢挑梁沿纵向的刚度变化和混凝土行车道板竖向变形受钢箱梁约束程度的变化,它们

是影响钢挑梁间荷载分布的主要因素。故根据式(1)、式(2)计算出的支承弹簧刚度和平面混凝土梁的等效截面宽度后,则可按图 4 所示的简化模型计算组合桥面板中钢挑梁的荷载分布。

3.4 沿挑梁纵向排列车轮荷载的简化

如图 7 所示,钢挑梁支承的混凝土行车道板上横桥向分布有多列车辆荷载时,由于若干个车轮沿挑梁纵向的作用位置不同,其轮载在挑梁间的分配比例也各不相同。当计算受载梁的荷载作用效应时,需分别将若干个车轮荷载作用点处的荷载分配系数求出,然后乘以对应的轮重得出作用在受载梁上的实际荷载。这种计算方法比较繁琐,如果用一个集中荷载来等效多个车轮荷载的作用,使结构具有相同的反应,则可以使问题大为简化。等效集中荷载计算如下:

$$P = \sum_{i=1}^n P_i \quad ; \quad A = \frac{\sum_{i=1}^n P_i A_i}{P} \quad (4)$$

式中各参数的含义见图 7: P 、 A 为等效集中荷载的大小和距挑梁悬臂根部的距离; n 为车轮荷载的个数; P_i 、 A_i 分别为车轮荷载的大小和距挑梁悬臂

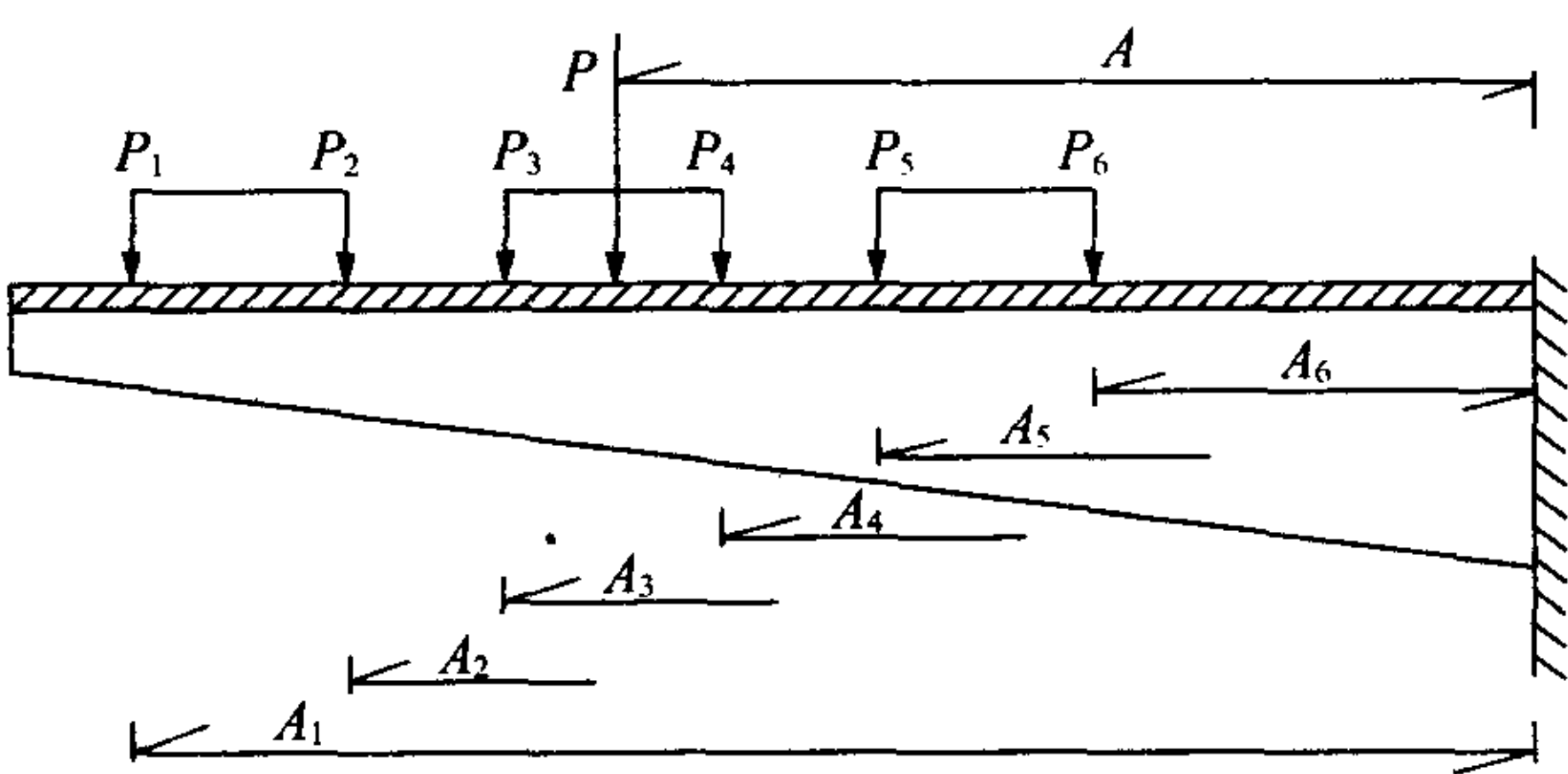


图 7 等效集中荷载计算示意

根部的距离。通过将分布的车轮荷载换算成一个等效集中荷载,可大大减少在设计车辆荷载作用下挑梁荷载分布系数的计算量,从而提高工作效率。

长沙洪山桥大悬臂桥面板为横向三车道,车辆荷载的重轴沿桥纵向作用于钢挑梁位置时该挑梁受力最不利。6 个车轮荷载与由式(4)计算得到的等效集中荷载对挑梁悬臂根部产生的作用效应对比见表 2,表中数据为 3 梁模型的空间有限元计算结果。从表 2 中可以看出,两种荷载作用下,挑梁悬臂根部产生的作用效应基本相同,因此计算挑梁间荷载分布时,可以用一个等效集中荷载来代替分布的车轮荷载。

表 2 车轮荷载与等效集中荷载作用效应对比

项 目	车轮荷载/kN						等效集中荷载/kN	误差/%
荷载大小	140	140	140	140	140	140	840	/
位置 A_i /m	12.0	10.2	8.9	7.1	5.8	4.0	8.0	/
荷载分布系数	0.693 3						0.698 7	0.8
固端弯矩/(kN·m)	-4 411.3						-4 507.3	2.1
固端剪力/kN	615.9						613.0	0.5

4 两种方法计算结果对比

长沙洪山大桥大悬臂组合桥面板的基本结构参数如下:钢挑梁悬臂长 13 m,其截面宽度为 0.7 m,悬臂根部、自由端部高度分别为 2.3 m 和 0.5 m;挑梁纵桥向间距为 4 m;混凝土行车道板厚 21 cm,根

部与钢箱梁固结。

采用本文提出的弹性支承连续梁简化方法和空间有限元方法(SFEM)计算得出的 3 梁模型钢挑梁荷载分布系数结果对比见表 3。

表 3 钢挑梁荷载分布两种计算方法结果对比

距自由端距离/m	0	1	3	5	7	9	11
弹簧刚度 K_x /($\times 10^7$ /N/m)	0.866 6	1.033	1.506 9	2.570 7	4.581 5	11.377	47.49
放大系数 α_i	1.0	1.063	1.23	1.488	1.923	2.8	5.448
简化算法分布系数	0.577 7	0.595 7	0.639 1	0.690 5	0.742 7	0.820 4	0.902 3
SFEM 分布系数	0.568 7	0.578 4	0.616 6	0.671 7	0.741 4	0.819 2	0.933 2
误差/%	0.9	2.9	3.5	2.7	0.2	0.1	3.4

由于弹性支承连续梁简化算法中, 支承弹簧刚度 K 和平面混凝土梁等效截面宽度 b_i , 分别考虑了变截面钢挑梁的刚度变化和钢箱梁对混凝土行车道板竖向变形约束程度的变化, 因此其荷载分布系数结果, 能真实地反映结构荷载分配的实际情况。从表 3 可以看出, 弹性支承连续梁简化算法与空间有限元法计算的荷载分布系数结果吻合较好, 最大误差在 5% 以内, 所以采用平面简化算法计算变截面钢挑梁并排支承混凝土行车道板组合结构的荷载分布问题是足够精确的。

5 结语

(1) 计算由多片悬臂钢挑梁并排支承的大悬臂组合桥面板荷载分布时, 可忽略相邻第 2 根挑梁的承载作用, 即采用对称 3 片梁模型计算具有足够的精度。

(2) 荷载位置愈靠近悬臂挑梁的固端, 相邻挑

梁的承载贡献愈小, 受载梁的荷载分布系数越大, 钢挑梁间的荷载分配差距愈大。

(3) 沿挑梁纵向排列的多排车轮荷载可以用一个等效集中荷载代替。

(4) 采用考虑了变截面钢挑梁刚度变化和钢箱梁对混凝土行车道板竖向变形约束程度变化的弹性支承连续梁平面简化算法得到的挑梁荷载分布系数较为准确, 因而该方法是可行的。

参考文献:

- [1] 邵旭东, 李立峰, 赵华, 等. 长沙洪山桥—竖琴式斜拉桥设计[J]. 湖南大学学报, 2001, 28(4).
- [2] 赵艳. 大悬臂钢—混凝土组合梁受力分析及实验研究[D]. 硕士学位论文, 2001.
- [3] JTG D62—2004, 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].

SFEM Analysis and Study on Simplified Calculation for Load Distributions on Long Cantilevered Beams of Steel-Concrete Composite Spine Girder

ZHANG Yang, SHAO Xu-dong, CHANG Ying

(College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: In this paper, the load distributions on long cantilever steel beams of the steel-concrete composite spine main girder of Hongshan Bridge located in Changsha City, are first calculated by using the spatial finite element method, the influence of load distributions on the cantilevered beams by the variation of load application point is analyzed, and it is educed that a analysis model of three beams for calculating the load distributions is acceptable. And then, a simplified calculation method of plane of elastic support continuous beam considering the variation of stiffness of cantilevered beams and how the steel box girder to restraint concrete slabs is proposed in calculation of the load distribution, and a few wheel loads distributing along the lateral direction of the bridge can be replaced by an equivalent concentrated load. Comparison of the above methods indicates that the simplified calculation method of plane is of a good precision and is feasible.

Key words: composite structure; spine girder; load distribution; finite element method; elastic support continuous beam; equivalent load