

# 桩板式结构中新建结构与旧路基接触面有限元分析

陈俊<sup>1</sup>, 万水<sup>2</sup>, 付理想<sup>1\*</sup>, 徐皓甜<sup>3</sup>

(1. 江苏瑞沃建设集团有限公司, 江苏 扬州 225600; 2. 东南大学, 江苏 南京 211102;

3. 华设设计集团股份有限公司, 江苏 南京 210014)

**摘要:**以高速公路改扩建项目中的桩板式结构设计为工程背景,建立含有桩板式结构、现浇段、横向搭板、旧路基和土体等多个部分的有限元数值仿真模型,并采用Ansys面-面接触的方式模拟新建结构-旧路基之间的搭接。通过有限元模拟,系统地研究单车辆、双车辆以及四车辆在不同工况下桩板式结构接触面之间的接触正应力、摩擦正应力以及变形的变化情况。研究结果表明:在四车辆布置下,结构接触面的正应力以及摩擦应力均为最大,且在工况23时(恒载+最外侧车轮距离承载板悬臂端6.05 m),为全局最不利受力情况,此时的最大接触正应力为302.936 kPa,接触最大摩擦应力为90.881 kPa;在工况24时,现浇段侧面与旧路基之间的横向间隙以及现浇段底面与土体的最大横向间隙为0.731 mm,最大竖向间隙为0.043 mm;横向搭板横向间隙最不利情况在工况25,间隙为0.273 mm,横向搭板竖向间隙最不利情况在工况7,间隙为0.203 mm。

**关键词:**道路工程;板-桩结构;公路改扩建;有限元分析;接触分析;力学性能

**中图分类号:**U415

**文献标志码:**A

## 0 引言

近年来,汽车数量以及交通出行次数不断增加,导致高速公路服务水平显著降低。因此,需要对既有高速公路实施改扩建<sup>[1-5]</sup>。传统的路基填筑方案存在征地困难、填土量大、施工周期长等严峻问题<sup>[6]</sup>。桩板式结构的提出能够有效地解决上述问题,且对环境污染较少,绿色环保<sup>[7-9]</sup>。然而桩板式结构在高速公路改扩建工程中的应用在近几年才开始出现,相关研究较少。

杨菲<sup>[10]</sup>针对公路桥下穿软土区高铁桥梁,提出了桩板式结构和空心板梁桥两种结构形式并进行数值模拟研究。在满足高速铁路结构保护及运营安全要求的情况下,桩板式结构较空心板梁,整体性更好且养护维修工作量少;许大晴等<sup>[11]</sup>以高速公路改扩建项目为背景,提出了桩板式梁桥结构,并对该结构的桩板连接、板与既有路基连接等提供了设计思路;郑吴棕<sup>[12]</sup>运用Ansys有限元软件,利用

多点约束MPC法中的MPC 184刚性梁设置<sup>[13]</sup>,连接一体化桩柱中的实体单元与梁单元以达到使多尺度连接界面两侧不同单元形式的管桩协同受力、传递力和力矩以及协调位移变形的目的,并建立两种接头类型不同的桩板结构进行疲劳分析以达到优选桩板接头的目的;朱俊等<sup>[14]</sup>以合肥至枞阳高速公路为背景,对桩板连接部位的疲劳性能进行了初步计算,并验证了填芯套筒式桩板连接方式的疲劳性能能够满足相关规范要求;杨庆云<sup>[15]</sup>依托合肥绕城高速公路拓宽工程,以桩板式结构的预制以及安装施工为研究对象,介绍了新型桩板式结构应用于公路上的施工工艺流程;雷进<sup>[16]</sup>依托G5011芜合高速公路林头至陇西立交段改扩建工程,建立桩与板连接构造的非线性有限元模型,验证了所设计的桩板连接构造满足工程项目的实际应用。总结以往的研究,在铁路领域中,桩板式结构基本都是独立的新建结构,研究也是针对结构本身进行分析。而在公路领域中,由于涉及到改扩建内容,需要考虑桩板式结构与旧路基以及土体之间的搭接,要建立

收稿日期:2022-11-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51878151)

作者简介:陈俊,男,大学本科,高级工程师.E-mail:470819024@qq.com

\*通信作者:付理想,男,硕士,工程师.E-mail:1036528237@qq.com

包含桩板式结构、旧路基和土体 3 个部分的整体模型,并对搭接处的受力和变形进行分析。除此之外,桩板式结构在公路改扩建领域应用的研究较少,缺乏在公路荷载作用下对该结构系统性的研究,因此需要对其进行合理的参数设计,为后续的工程应用提出良好的建议。

## 1 工程概况

本文的工程研究对象是某高速公路改扩建项

目中的桩板式结构,该公路原为双向四车道。随着沿线社会经济的快速发展,该高速公路的交通量增长迅猛,高峰段的服务水平已明显降低,其中某段通行状况已基本接近饱和,通行条件及行车安全已不能适应目前以至将来交通发展的需求,亟需进行改扩建。根据项目功能定位、路网布局以及交通量预测情况,本项目拟采用以“双侧拼宽为主,局部分离为辅”的总体扩建方案,扩建为双向八车道高速公路,如图 1 所示,路基标准宽度 42 m,设计速度 120 km/h。

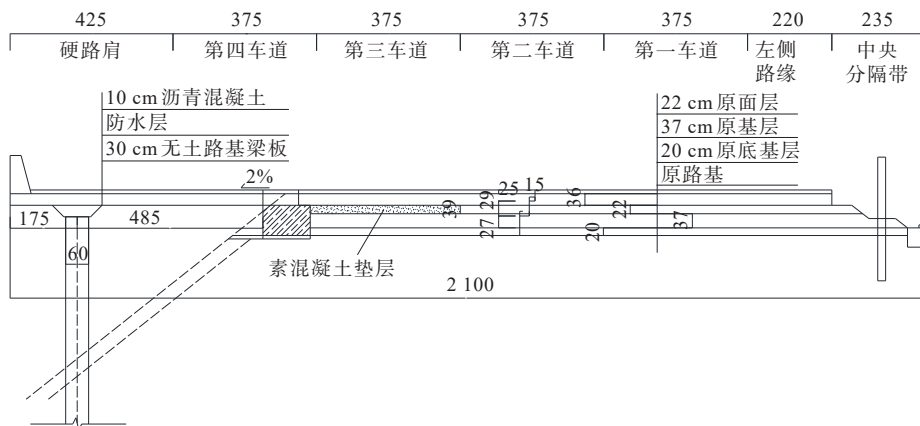


图 1 桩板式结构(单位:cm)

## 2 有限元模型的建立

本项目为独立墩柱式桩板结构。此类结构的承载板为双向板,板的结构以及边界条件较为复杂,并且该类结构涉及到桩-土接触、板-土接触以及板-旧路基接触等非线性问题,在多数情况下无法对其进行解析解的求解。为了更好地了解桩板式结构的受力以及变形情况,可采用数值计算方法进行分析。有限单元法作为一种数值计算方法,具有较强的适用性,能够处理非均质、非线性、复杂边界等诸多问题。本文选用 Ansys 有限元分析软件对桩板式结构进行分析,其中承载板、铺装层、桩柱、土体和旧路基部分均采用空间实体单元进行离散。桩板式结构有限元模型示意如图 2 所示。

### 2.1 单元类型和本构模型的选取

#### 2.1.1 单元类型

承载板、桩柱、土体、路基面层和基层以及沥青铺装层均采用 Solid 45 单元模拟。Solid 45 单元通过 8 个节点来定义,并运用于三维实体结构模型。每个

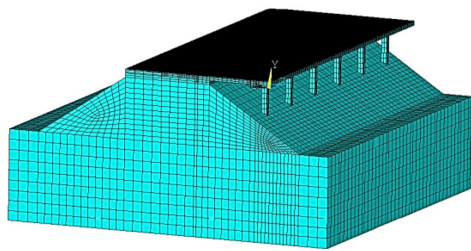


图 2 桩板式结构有限元模型示意图

节点具有包括沿 X、Y 和 Z 3 个方向的平动自由度,同时该单元具有塑性、蠕变、膨胀、应力强化、大变形和大应变的特征。有限元模型进行网格划分采用六面体网格划分。

#### 2.1.2 Drucker-Prager 弹塑性模型

Drucker-Prager 弹塑性模型是考虑静水压力影响的广义 Mises 屈服和破坏准则,其强度理论同时反映了体积应力、剪应力和中间主应力对岩石强度的影响。Ansys 软件采用该准则去近似 Mohr-Coulomb 屈服准则,可适用于混凝土、岩体和土体等材料中。Drucker-Prager 屈服准则以 Mohr-Coulomb 屈服准则和 Mises 屈服准则为基础而得:

$$F = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} - K \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{2 \sin \varphi}{\sqrt{3} (3 - \sin \varphi)} \quad (2)$$

$$K = \frac{6c \cos \varphi}{\sqrt{3} (3 - \sin \varphi)} \quad (3)$$

式中: $c$ 、 $\varphi$ 为岩土材料的黏聚力和内摩擦角; $I_1$ 为应力第一不变量; $J_2$ 为偏应力第二不变量。

Drucker-Prager屈服准则在主应力空间呈现出的屈服面是一个圆锥。在Ansys软件中使用DP模型,不仅需要输入内摩擦角 $\varphi$ 和黏聚力 $c$ 的值,还需要输入膨胀角 $\phi_f$ 参数。膨胀角控制将要发生的体积膨胀的数量。当 $\phi_f = \varphi$ ,结果会发生明显的体积膨胀;若 $\phi_f < \varphi$ ,会发生较小的体积膨胀;若 $\phi_f = 0$ ,则不发生体积膨胀。Ansys中自带的Drucker-Prager模型能够较好地解决因剪切型Mohr-Coulomb屈服面在主应力空间是六棱锥面,其导数在角点处无法连续,给计算造成困难这一难题。故本文中土体的本构关系采用Drucker-Prager模型。

## 2.2 接触界面的单元参数

本文采用面-面接触单元并默认使用增广的Lagrange乘子法来模拟相互的约束关系。因为桩、板的刚度明显大于土和旧路基的刚度,所以桩、板实体接触表面设置为Target 170目标面,土体和旧路基实体接触表面设置为Conta 174接触面。其中目标单元能够侵入接触面,而接触单元被约束,不能侵入目标面。因桩柱和板是大块实体,所以法向接触刚度因子 $F_{FKN}$ 取值为1.0,穿透容差系数 $C_{FTOLN}$ 取0.1。并假定接触面之间的摩擦是库仑摩擦。接触面之间的摩擦系数取值可以依据美国规范NAVFAC总结的经验表,界面摩擦系数取0.3。

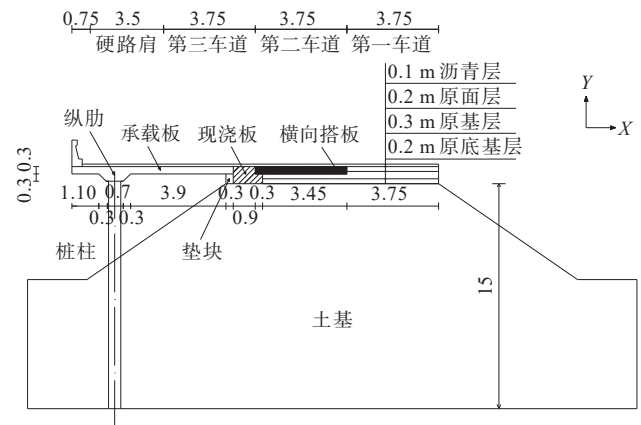
## 2.3 计算参数与边界条件

### 2.3.1 桩板式结构尺寸参数

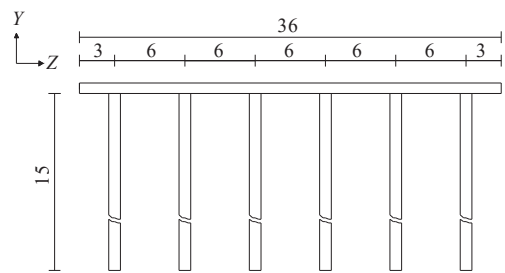
参考工程项目中的桩板式结构试验段形式,标准跨径为6 m,设置5跨,并向纵向两侧各延伸半个跨径。承载板长36 m,宽6.6 m,厚0.3 m。现浇段宽0.9 m,厚0.7 m。横向搭板宽3.75 m,厚0.3 m。承载板、现浇段以及横向搭板之间为刚结。预制承载板设一道纵肋,纵肋高0.6 m,纵肋底部宽0.7 m,倒角尺寸为0.3 m,纵肋中心距预制承载板悬臂端的距离为

1.75 m。垫块宽0.3 m,高0.3 m。设置厚度为10 cm的沥青铺装层。

桩的截面形式为圆形,桩径0.6 m,桩长15 m。依据工程现场实际情况并结合Ansys软件的有效运算量以及准确性,选取土体纵向长度与承载板纵向长度等长为36 m,土体深度15 m,土体顶面宽8.4 m,底面宽33 m,土体边坡率为1:1.5。旧路基段设有原面层、原基层和原底基层,厚度分别为0.2 m,0.3 m和0.2 m。原面层、原基层和原底基层之间连续。有限元建模中, $X$ 轴为桩板式结构的横断面方向, $Z$ 轴为桩板式结构的纵断面方向, $Y$ 轴为桩板式结构的竖直方向。桩板式结构横断面以及纵断面示意图如图3所示。



(a) 横断面



(b) 纵断面

图3 桩板式结构断面图(单位:m)

主要材料有承载板、桩柱、现浇段、横向搭板、沥青铺装层、原面层、原基层、原底基层和土体,其中承载板、现浇段和横向搭板为C40混凝土,桩柱为C80混凝土,具体材料参数取值如表1所示。

### 2.3.2 计算荷载

计算荷载包括恒载和活载。恒载是自重荷载,活载是车辆荷载。车辆荷载的布置及平面尺寸如图4所示。

表 1 主要材料参数

材料	弹性模量/MPa	密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	泊松比	黏聚力/kPa	内摩擦角/( $^{\circ}$ )	膨胀角/( $^{\circ}$ )
承载板	35 000	2 500	0.20	—	—	—
桩柱	38 000	2 500	0.20	—	—	—
横向搭板	35 000	2 500	0.20	—	—	—
现浇段	35 000	2 500	0.20	—	—	—
沥青	1 600	2 460	0.35	—	—	—
原面层	1 490	2 440	0.30	—	—	—
原基层	1 500	2 300	0.25	—	—	—
原底基层	1 490	2 300	0.25	—	—	—
土体	8	1 950	0.28	16.5	27	0

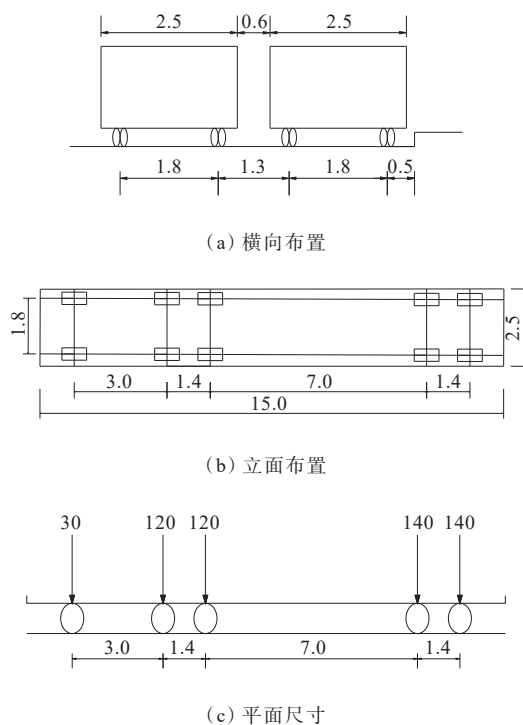


图 4 车辆荷载布置示意图(单位:m)

### 2.3.3 边界条件和网格尺寸

在圣维南原理中,如果物体一小部分边界上的面力是一个平衡力系,那么就只会使近处产生显著应力,远处可以忽略不计。依据此原理,将土体沿着道路纵向的两侧设置为Z向约束,土体沿着道路横向的两侧设置为X、Y约束,土体底部X、Y、Z三向约束。承载板沿道路纵向两侧,设置为Z向约束。土体和旧路基段的网格尺寸的长宽高均为1 m。桩柱、承载板、沥青铺装层的网格尺寸划分长宽高均为0.5 m。

## 2.4 计算工况

如图1所示,桩板式结构的有限元模型有3个车

道。硬路肩和第三车道在承载板上。在第二车道处采用横向搭板过渡以避免搭接部分和路基部分的不均匀沉降,第二车道与第一车道之间为横向搭板与旧路基拼接处,刚度变化大,容易产生裂缝。整个模型涉及多个部分,车道数较多。当车辆荷载作用在不同的位置时,对结构影响的效果差异性较大,且荷载作用下的最不利工况无法确定。因此将分别选取横向单车荷载、横向双车荷载以及在横向双车荷载基础上再增设纵向两车共四车荷载,以遍历的方式沿着一定的宽度进行横向移动实现加载。双车荷载时,车身的中部是布置在承载板的中跨跨中处。而在四车荷载时,车辆后轴的最后排车轮作用在边跨支点处,且纵向前后两辆车之间的距离为17 m。

### 2.4.1 单车荷载横向加载

工况1~7:恒载+最外侧车轮距离承载板悬臂端1.05~13.05 m(每隔2 m为一个工况),车辆横向位置以及纵向位置如图5所示。

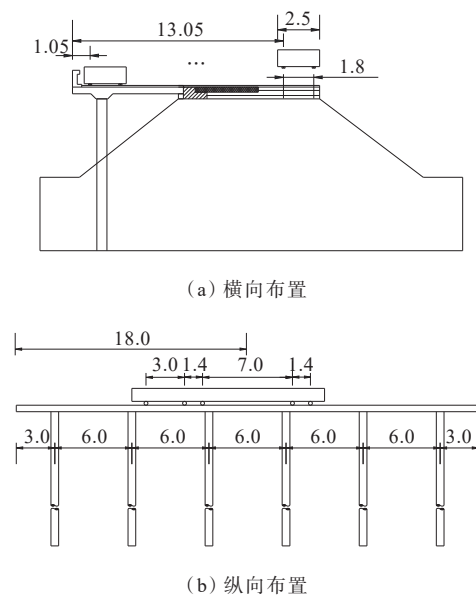


图 5 不同工况下单车荷载加载示意图(单位:m)

### 2.4.2 双车荷载横向加载

工况8~17:恒载+最外侧车轮距离承载板悬臂端1.05~10.05 m(每隔1 m为一个工况),车辆横向位置以及纵向位置如图6所示。

### 2.4.3 四车荷载横向加载

工况18~27:恒载+最外侧车轮距离承载板悬臂端1.05~10.05 m(每隔1 m为一个工况),四车荷载横向位置以及纵向位置如图7所示。



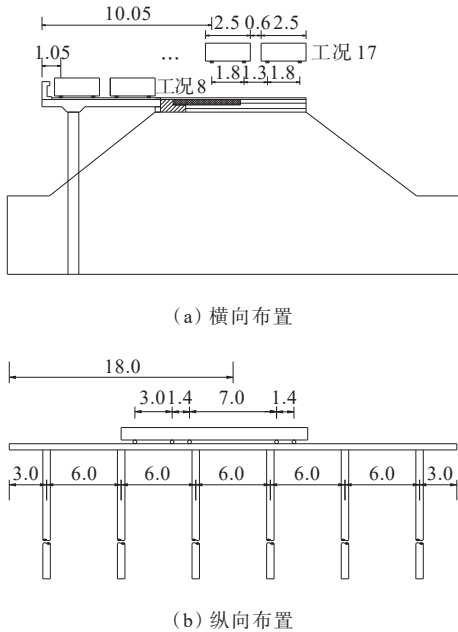


图6 不同工况下双车辆加载示意图(单位:m)

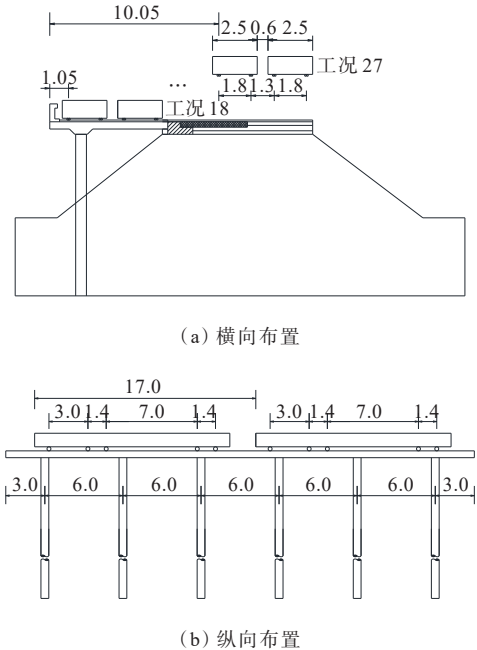


图7 不同工况下四车辆加载示意图(单位:m)

3 接触应力与变形有限元计算结果分析

桩板式结构与旧路基段进行搭接,承载板、现浇段以及横向搭板刚结。现浇段的底面以及靠近旧路基段的侧面分别与土体和旧路基间发生接触,横向搭板的底面以及靠近旧路基段的侧面均与原有路基发生接触,如图8所示。在荷载作用下,桩板式结构的拼接部分会产生变形,为更好地模拟混凝土结构

与土体、混凝土结构与旧路基之间的连接接触应力状况,在有限元分析中,选择面-面接触的方式,并对单车辆横向加载、双车辆横向加载以及四车辆横向加载3种工况,分析在车辆荷载和恒载作用下,接触面的应力以及变形情况。

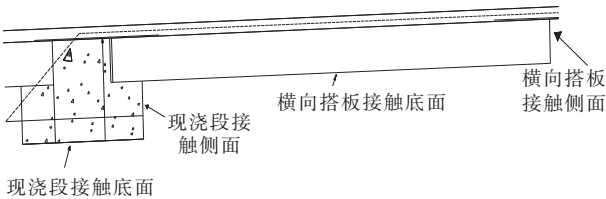


图8 现浇段与横向搭板接触面示意图

3.1 单车辆横向加载

在恒载和单车辆荷载作用下,当车辆荷载以横向每2 m的长度进行移动时,接触面的最大压应力、最大摩擦应力以及变形的计算结果如表2所示。

表2 单车辆横向加载下接触面应力与变形

工况	最大压应力/ kPa	最大摩擦应力/ kPa	现浇段/mm		横向搭板/mm	
			最大横向间隙	最大竖向间隙	最大横向间隙	最大竖向间隙
1	58.847	8.989	0.104 0	0.004 51	0.021 0	0.006 35
2	58.976	13.904	0.088 0	0.010 00	0.006 7	0.008 50
3	61.312	16.438	0.146 0	0.016 00	0.013 0	0.012 30
4	133.349	27.317	0.273 0	0.036 00	0.007 1	0.029 30
5	221.372	66.411	0.442 0	0.018 7	0.149 0	0.090 30
6	104.680	31.404	0.307 0	0.007 4	0.195 0	0.096 00
7	75.807	22.742	0.088 2	0.007 4	0.109 0	0.203 00

从表2可以看出:工况1~3时,单车辆荷载的横向移动对于接触面的最大压应力影响较小。因为车轮荷载作用在承载板上,并没有作用在设有接触面的区域。随着车辆荷载不断横向移动后,即车轮开始作用在现浇段并不断向旧路基方向移动时,最大压应力呈现出显著增大的趋势,工况5时,达到最大压应力值。当车辆荷载继续移动时,即一侧车轮开始作用在旧路基上,最大压应力逐渐减小。由此可以得出单车辆荷载在工况5时,即最靠近旧路基一侧的车轮作用在横向搭板与旧路基拼接接缝处时,达到最大压应力。同时,最大摩擦应力明显小于最大压应力,整体变化趋势同最大压应力的趋势基本一致,也是在工况5时,摩擦应力达到最大值。除此之

外,在工况 1~3 时,随着车辆荷载的横向移动,摩擦应力值逐渐增大。现浇段横向最大间隙指在荷载作用下,现浇段与旧路基在横向会发生分离。现浇段侧面与旧路基接触部分的横向间隙越大,说明现浇段与旧路基在横向分离越大。由表 2 可知:现浇段横向最大间隙呈现出先增大后减小的趋势,在工况 5 时达到最大值 0.442 mm。在工况 1~6 内,现浇段与路基接触部分发生完全分离,在工况 7 时部分分离。现浇段竖向间隙指在荷载作用下,现浇段底端即与土体接触的部分在竖向会和土体发生分离。现浇段底面与土体的竖向间隙越大,说明现浇段与土体在竖向分离越大。当单车荷载横向移动时,竖向间隙先增大后减小,在工况 4 时即一侧车轮作用在现浇段,另一侧车轮作用在横向搭板时,达到最大。

### 3.2 双车辆横向加载

在恒载和横向双车辆荷载作用下接触面的受力与变形计算结果如表 3 所示,车辆荷载以横向每 1 m 的宽度进行移动。

表 3 双车辆横向加载下接触面应力与变形

工况	最大压	最大摩	现浇段/mm		横向搭板/mm	
	应力/ kPa	擦应力/ kPa	最大横 向间隙	最大竖 向间隙	最大横 向间隙	最大竖 向间隙
8	54.192	8.123	0.103	0.007 4	0.009 8	0.005 9
9	72.552	21.766	0.148	0.015 1	0.008 1	0.012 8
10	84.963	22.932	0.211	0.029 3	0.012 6	0.022 8
11	128.600	35.017	0.272	0.034 9	0.006 2	0.027 1
12	246.250	70.846	0.401	0.030 2	0.031 0	0.021 8
13	276.940	83.082	0.548	0.030 8	0.143 0	0.087 2
14	133.242	39.972	0.578	0.027 5	0.173 0	0.075 3
15	93.410	28.023	0.576	0.023 8	0.241 0	0.101 0
16	82.448	21.511	0.451	0.012 9	0.235 0	0.079 6
17	117.286	35.185	0.319	0.009 9	0.184 0	0.172 0

从表 3 可以看出:工况 8~13 内,随着双车辆荷载的横向移动,接触面的最大压应力不断增大,在工况 13~17 区域内,最大压应力先减小再增大。最大摩擦应力的变化趋势与最大压应力的变化趋势一致,都在工况 13 达到最大值,即工况 13 能够产生最大压应力和摩擦应力,此时两辆车均作用在混凝土结构上,最靠近旧路基段的一侧车轮作用在横向搭

板与旧路基拼接接缝处。在工况 8~11 的区域内,车辆荷载不能有效地影响横向搭板处的横向间隙,在工况 11~17 区域内,呈现出先增大后减小的趋势,并在工况 15 达到最大值 0.241 mm,此时靠近旧路基段的一个车辆的车轮荷载大部分都作用在旧路基段,并且横向搭板与旧路基之间的竖向间隙总体上呈增大趋势,并在工况 17 达到最大值 0.172 mm,此时一辆车完全作用在旧路基上,另一辆车部分作用在旧路基上。

### 3.3 四车辆横向加载

四车辆的横向布置与双车辆横向布置相同,不同点在于其在纵向上增加了两辆车,车辆荷载以横向每 1 m 的宽度进行移动,在恒载和四车辆荷载作用下接触面的有限元计算应力和变形数据如表 4 所示。

表 4 四车辆横向加载下接触面应力与变形

工况	最大压	最大摩	现浇段/mm		横向搭板/mm	
	应力/ kPa	擦应力/ kPa	最大横 向间隙	最大竖 向间隙	最大横 向间隙	最大竖 向间隙
18	42.784	8.476	0.107	0.006 9	0.001 2	0.006 2
19	60.868	18.260	0.163	0.018 0	0.000 0	0.015 3
20	81.262	16.260	0.241	0.031 9	0.002 1	0.023 0
21	141.610	27.560	0.341	0.027 8	0.011 0	0.020 0
22	277.794	76.775	0.473	0.038 0	0.043 4	0.027 3
23	302.936	90.881	0.703	0.038 0	0.170 0	0.102 0
24	168.880	50.664	0.731	0.043 0	0.212 0	0.096 2
25	107.159	32.147	0.716	0.034 4	0.273 0	0.120 0
26	94.764	28.429	0.518	0.019 7	0.234 0	0.101 0
27	185.311	55.590	0.264	0.009 1	0.159 0	0.109 0

由表 4 可知:随着四车辆荷载的横向移动,接触面最大压应力、最大摩擦应力整体趋势为先增大再减小,在工况 23 时,接触面的压应力、摩擦应力最大,此时四辆车均作用在混凝土结构上,最靠近旧路基段的一侧车轮作用在新建结构与旧路基的拼接接缝处。同时,在工况 24 条件下,现浇段横向间隙出现最大值 0.731 mm,竖向间隙也产生最大值 0.043 mm,此时一侧车轮作用在旧路基段。在恒载和四车辆荷载下,现浇段侧面接触面与旧路基在横向上完全分离。

## 4 结论

以某高速公路改扩建工程中桩板式结构为工程背景并进行有限元仿真。在恒载和活载共同作用下,以遍历的方法确定了单车辆荷载横向移动的7个工况、双车辆荷载横向移动的10个工况以及四车辆荷载横向移动的10个工况,总共27个工况,建立了桩板式结构、旧路基和土体的空间有限元模型,对其在各个工况下的接触应力与变形进行了详细分析,得出以下结论:

(1) 在不同车辆荷载下,随着车辆荷载不断向旧路基段横向移动时,接触面的压应力和摩擦应力均呈现先增大后减小的趋势,并都在工况23达到最大值,此时压应力为302.936 kPa,摩擦应力为90.881 kPa,此时为恒载和四车辆荷载共同作用,且车辆荷载全部作用在混凝土结构上,其中一侧车轮作用在拼接接缝处。

(2) 当恒载和车辆荷载作用在新建混凝土结构上,现浇段与旧路基接触的侧面会和旧路基在横向上完全分离。现浇段侧面与旧路基之间的横向间隙以及现浇段底面与土体的竖向间隙的最大值出现在工况24,最大横向间隙为0.731 mm,最大竖向间隙为0.043 mm,此时四车辆荷载中的一侧车轮作用在旧路基段。

(3) 在恒载和车辆荷载作用下,横向搭板侧面与旧路基接触部分在横向仅发生部分分离,横向搭板横向间隙最不利情况在工况25,为0.273 mm,此时四车辆荷载最靠近旧路基段的一个车辆的车轮大部分作用在旧路基段。横向搭板竖向间隙最不利情况在工况7,为0.203 mm,此时单车辆荷载全部作用在旧路基上。

## 参考文献:

- [1] 周勇,韩冬.高速公路改扩建工程新旧桥临时拼接方案研究[J].中外公路,2019,39(6):118-122.
- [2] 岳军委.高速公路改扩建工程设计方法探讨[J].中外公路,2015,35(6):343-346.
- [3] 林晓阳.广西沿海高速公路改扩建工程设计[J].中外公路,2012,32(4):1-4.
- [4] 姜正晖.高速公路改扩建沥青路面设计关键问题探析[J].中外公路,2020,40(4):58-61.
- [5] 熊文磊,马天奕,李卓智.高速公路改扩建左侧硬路肩设置影响因素探讨[J].中外公路,2021,41(1):310-313.
- [6] 张金,张焱发,潘丹.预留远期改扩建条件下高速公路超前设计探讨[J].中外公路,2020,40(4):318-322.
- [7] 董开业.公路桩板路关键部位建模方法及受力研究[D].合肥:合肥工业大学,2021.
- [8] 孙宁,高鹏,康健.高速公路改扩建项目既有空心板桥的拼宽计算分析[J].中外公路,2019,39(5):111-114.
- [9] 张宇,吴忠广,田万利,等.基于VISSIM仿真的高速公路改扩建工作区布设分析[J].中外公路,2021,41(3):352-357.
- [10] 杨菲.桩板及空心板梁桥结构下穿软土区高铁桥梁的数值模拟研究[J].公路,2017,62(11):73-79.
- [11] 许大晴,席进.桩板式梁桥在高速公路改扩建项目中的应用[J].现代交通技术,2017,14(6):40-42.
- [12] 郑吴棕.桩板式路基桩板接头性能研究[J].工程与建设,2018,32(1):68-71,82.
- [13] MCCUNE R W, ARMSTRONG C G, ROBINSON D J. Mixed-dimensional coupling in finite element models[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2000, 49(6):725-750.
- [14] 朱俊,丁楠.桩板式路基桩板连接接头疲劳性能分析[J].工程与建设,2018,32(5):673-675.
- [15] 杨庆云.基于工业化建造的公路桩板式路基施工技术研究[J].城市建设理论研究(电子版),2018(18):128-129.
- [16] 雷进.基于ANSYS的公路桩板式结构连接构造非线性有限元分析[J].工程与建设,2019,33(5):780-782.