

基于响应面法的节段预制 混凝土 T 型梁抗剪性能分析

王震宇, 赵宇城, 卜建清

(石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043)

摘要:为研究节段预制混凝土 T 型梁接缝参数对其抗剪性能的影响,采用中心复合试验与有限元仿真相结合的方法,探究了节段预制拼装 T 型梁的键齿数量、键齿深度、梁体总长和混凝土强度这 4 个参数对抗剪性能的影响规律,并进行了相应的响应面回归分析。研究表明,运用响应面法得到了节段预制拼装 T 型梁各参数对其抗剪性能影响的回归方程,其预测结果与有限元仿真的实际结果吻合较好,误差在可以接受的范围内,为后续研究节省了计算成本。研究内容对同类结构桥梁的设计提供了可靠的理论依据。

关键词:节段预制;数值模拟;抗剪性能;响应面法

中图分类号:U443.35 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-0373(2023)02-0020-09

0 引言

节段预制拼装桥梁由于其具有施工标准统一、施工限制条件少、工期短的优点,在世界上得到广泛的发展和应用。节段预制拼装桥梁的接缝由环氧树脂胶和键齿组成,接缝处的抗剪强度由键齿和预应力筋对键齿施加的正应力共同承担,所以节段间接缝是预制桥梁受力的关键和薄弱部位。为了探究节段间接缝的力学性能,国内外学者做了大量的试验研究和数值模拟。

AHMED et al^[1-2]发现随着正应力和剪力键数量增加,可提高节段预制箱梁桥的刚度和延性,胶接缝破坏表现为突发性和脆性。WRAYOSH et al^[3]研究了箱形节段梁在静荷载下,胶接缝和碳纤维、钢纤维加固的接缝破坏主要发生在邻近接缝处。KIM et al^[4]对预制节段梁随养护时间变化时剪力键的性能进行了试验研究,分析了剪力键的开裂破坏行为,并对剪力键的抗剪强度特征进行了对比分析。袁爱民等^[5]进行了剪力键键齿深和键齿距对节段预制桥梁剪切性能影响的试验研究,结果表明其破坏类型属于脆性破坏。卢文良等^[6]发现节段预制拼装桥梁胶接缝中过厚的环氧树脂胶会降低桥梁的整体刚度,且会增大预应力损失。轩帅飞^[7]结合规范上的公式,提出了节段梁胶接缝处的抗剪承载力计算公式和弯剪承载力计算公式。ALCALDE et al^[8]发现增加剪力键的数量会降低接缝抗剪承载力,并推导了抗剪承载力回归公式。SHAMASS et al^[9]依据数值模拟提出了对节段拼装梁胶接缝数值分析方法。

综上,在当前已有的研究成果中,采用的研究方法通常是设置不同的参数进行试验研究以探究各参数对节段预制拼装桥梁力学性能的影响。既有研究所得到的试验数据丰富,然而缺乏能与试验结果吻合良好的有限元模型。在对节段预制拼装桥梁抗剪性能进行分析时,多以控制变量法分析其单一参数改变如何影响节段预制拼装桥梁的抗剪性能,缺少对节段预制拼装桥梁各个参数共同改变时对其抗剪性能的影响。现以试验数据为依据,建立了与试验结果吻合较好的有限元模型,在此基础上对不同参数的节段预制胶接缝混凝土 T 型梁的抗剪性能进行分析,并进一步归纳出各参数对于节段预制胶接缝混凝土 T 型

收稿日期:2022-10-19 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxbzb.20220317

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFB2600600,2021YFB2600605);河北省重点研发计划项目(19275405D)

作者简介:王震宇(1996—),男,硕士研究生,研究方向为桥梁结构设计理论与施工控制。E-mail:1353362640@qq.com

王震宇,赵宇城,卜建清.基于响应面法的节段预制混凝土 T 型梁抗剪性能分析[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2023,36(2):20-28.

梁的弹性极限承载力以及最大挠度的影响公式,为后续有限元模拟节省计算成本。

1 胶接缝有限元模型验证

1.1 模型的基本几何参数

为保证数值模拟的准确性,以直剪试验^[10]中的胶接缝剪力键试件为依据建立有限元模型,进行对比验证。该试验试件为钢筋混凝土结构,混凝土强度等级是C50,试件沿接缝方向的高度为540 mm,宽度340 mm,厚度150 mm。接缝处设置一个剪力键,键齿顶部宽50 mm,底部宽100 mm,键齿深度为35 mm,具体尺寸如图1所示。在加载过程中,剪力键试件两侧设置水平方向的约束钢板,通过油压千斤顶在约束钢板上施加侧向预压力,防止试件在推出过程中发生侧向滑移,试验时对试件施加初始侧向约束力,可以在接缝面上形成纯剪切的受力状态。试验加载装置如图2所示。

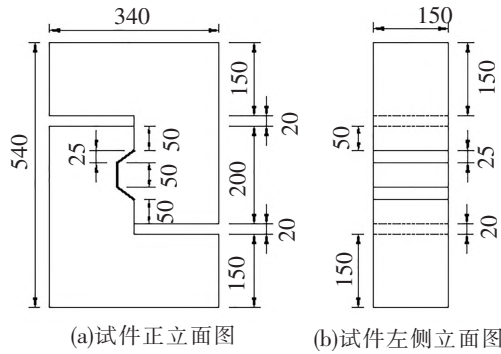


图1 文献[10]的几何参数(单位:mm)

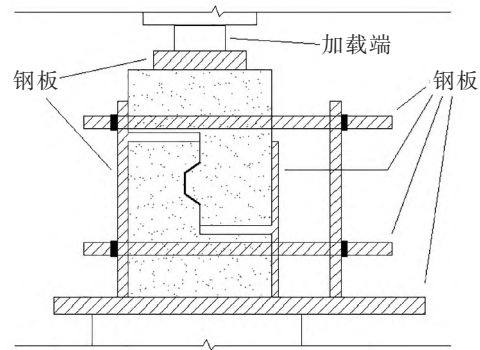


图2 试验加载装置

1.2 有限元模型的建立

建立上述直剪试验的有限元模型,几何参数如前所述。在有限元模型中有3种用于模拟混凝土力学特性的本构模型:脆性开裂模型、弥散开裂模型和损伤塑性模型。脆性开裂模型多用于模拟混凝土的拉伸裂纹。当采用相同的材料特性模拟混凝土力学特性时,使用弥散开裂模型得到的结构刚度比损伤塑性模型偏大,损伤塑性模型得到的结果更准确。所以混凝土本构模型选用塑性损伤模型,参考混凝土结构设计规范中的本构关系。

受压本构关系为

$$\sigma = (1 - d_c) E_c \epsilon \quad (1)$$

$$d_c = \begin{cases} 1 - \frac{\rho_c n}{n - 1 + x^n} x & x \leq 1 \\ 1 - \frac{\rho_c}{\alpha_c (x - 1)^2 + x} & x > 1 \end{cases} \quad (2)$$

$$\rho_c = \frac{f_{c,r}}{E_c \epsilon_{c,r}} \quad (3)$$

$$n = \frac{E_c \epsilon_{c,r}}{E_c \epsilon_{c,r} - f_{c,r}} \quad (4)$$

$$x = \frac{\epsilon}{\epsilon_{c,r}} \quad (5)$$

式中, d_c 为混凝土材料的单轴压缩损伤演化系数; α_c 为混凝土材料单轴压缩曲线下降段的参数值; E_c 为混凝土材料的弹性模量; $f_{c,r}$ 为混凝土材料的单轴抗压强度代表值,根据结构分析计算要求可以取标准值、设计值或平均值等; $\epsilon_{c,r}$ 为单轴抗压强度代表值相应的混凝土峰值压应变; n 为变量; ρ_c 为推导过程中的参数,无实际意义。

受拉本构关系为

$$\sigma = (1 - d_t) E_c \epsilon \quad (6)$$

$$d_t = \begin{cases} 1 - \rho_t [1.2 - 0.2x^5] & x \leq 1 \\ 1 - \frac{\rho_t}{\alpha_t (x-1)^{1.7} + x} & x > 1 \end{cases} \quad (7)$$

$$x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{t,r}} \quad (8)$$

$$\rho_t = \frac{f_{t,r}}{E_c \varepsilon_{t,r}} \quad (9)$$

式中, σ 为应力; ε 为应变; E_c 为混凝土材料的弹性模量; d_t 为混凝土材料的单轴拉伸损伤演化系数; α_t 为混凝土材料单轴拉伸曲线下降段的参数值; $f_{t,r}$ 为混凝土材料的单轴抗拉强度代表值, 根据结构分析计算要求可以取标准值、设计值或平均值等; $\varepsilon_{t,r}$ 为单轴抗拉强度代表值相应的混凝土峰值拉应变; x 为变量; ρ_t 为推导过程中的参数, 无实际意义。

混凝土塑性损伤模型本构中的基本参数取值如表 1 所示, 其中, f_{b0}/f_{c0} 为初始等效双轴抗压屈服应力与初始单轴抗压屈服应力的比值, K 为拉伸子午面上与压缩子午面上的第二应力不变量之比。

表 1 混凝土材料塑性参数

弹性模量/GPa	泊松比	膨胀角/(°)	偏心率	f_{b0}/f_{c0}	K	黏性参数
36	0.2	30	0.1	1.16	0.666 7	0.000 5

胶接缝直剪试验试件有限元模型是否准确关键在于能否对接缝的受力状态进行恰当的模拟。在建立有限元模型的过程中, 通过选择绑定的相互作用关系来对模拟接缝处的胶结作用, 这是因为一方面环氧树脂胶与混凝土界面的结合强度远远高于混凝土的抗压强度, 所以破坏发生在接缝周围的混凝土, 而不是接缝处。另一方面环氧树脂的抗拉压强度远高于混凝土, 所以混凝土比环氧树脂更早发生破坏。因此在用有限元软件模拟加载过程中, 开裂发生在胶接缝附近的混凝土区域, 而不是胶接缝处, 并且环氧树脂胶的厚度远小于试件的几何尺寸, 所以采用绑定的接触关系模拟胶接缝的力学行为, 而不是将环氧树脂胶的几何尺寸及材料参数建立在模型的实体单元之中。

有限元模型加载时, 对试件左右两侧截面施加横向和纵向约束, 以模拟实际的加载情况。为了方便地提取模型的荷载位移曲线, 设置模型的横向加载方式为位移加载, 同时在试件最右侧的中心建立参考点, 并将参考点与试块右表面进行耦合, 在参考点处施加线性递增的横向位移, 最大位移量为 0.01 m。在有限元模型的底面施加竖向和横向约束, 以模拟真实加载时的边界条件。为了避免可能出现的剪力自锁现象, 有限元模型单元类型选择八节点减缩积分三维实体单元 (C3D8R), 网格精度为 50 mm, 建立的有限元模型如图 3 所示。

图 4 为有限元模型上侧面参考点 RP-1 的荷载位移曲线图。通过对图 4 的分析可知, 有限元模型的荷载位移曲线可大致分为弹性阶段和非线性阶段。加载初期, 试件的位移变形与外荷载成近似的线性关系, 试件处于弹性受力状态。当荷载加到 130 kN 附近时, 试件的刚度开始下降。随着加载的继续, 试件的裂缝持续扩展, 试件的刚度连续下降。当加载进行到最后阶段, 在荷载变化较小的情况下, 跨中挠度显著增长, 试件变形进入非线性阶段。试件的弹性极限抗剪承载力约为 130 kN, 竖向相对位移为 0.4 mm。数值模拟与试验结果的荷载位移曲线规律基本一致。

图 5 为破坏时应力云图, 由图 5 可以看出, 试件在破坏时, 键齿周围出现高应力区域。图 6 为破坏时等效塑性应变云图, 由图 6 可以看出, 试件最终破坏表现为键齿沿剪切面被剪坏, 破坏裂缝重要集中于键齿区域。经过分析对比, 数值模拟结果与试验结果吻合良好, 验证了有

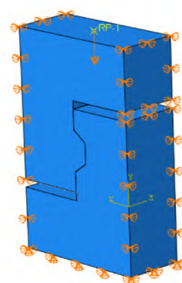


图 3 三维有限元分析模型

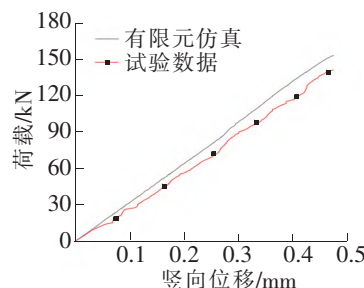


图 4 荷载位移曲线

限元软件开展数值模拟分析胶接缝在直剪试验中力学行为的合理性,建立的有限元模型可以较为准确地模拟试件的力学行为。

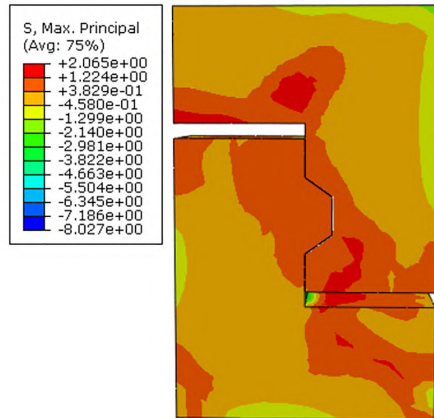


图 5 破坏时应力云图

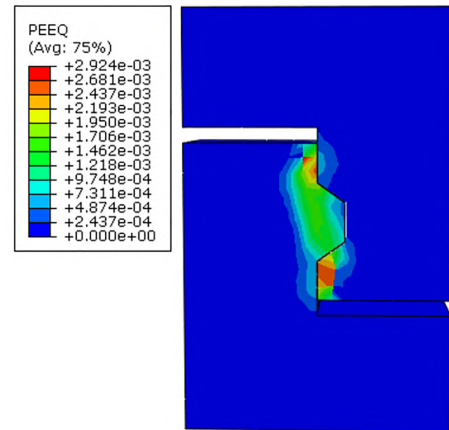


图 6 破坏时等效塑性应变云图

2 胶接缝响应面参数分析

2.1 有限元模型的建立

采用上述有限元模型建立方法,进一步探究不同参数对节段预制拼装梁抗剪承载力的影响。以混凝土 T 梁的多剪力键腹板作为研究对象,建立三维实体有限元模型。模型为两节段悬臂梁,集中力作用位置为悬臂梁端部。混凝土弹性模量为 35 GPa,泊松比为 0.2。翼缘高度为 600 mm,宽度为 6 400 mm;腹板高度为 1 200 mm,宽度为 700 mm;底部高度为 500 mm,宽度为 2 400 mm。有限元模型选用绑定的接触关系模拟胶接缝的力学行为,加载点位于模型端部的腹板中心处,在保证精度的同时兼顾计算效率,模型的网格尺寸在接缝附近划分为 50 mm,其余网格尺寸为 200 mm。参考文献[11]中的 T 型梁截面形式,建立有限元模型,具体的有限元模型尺寸如图 7 所示。

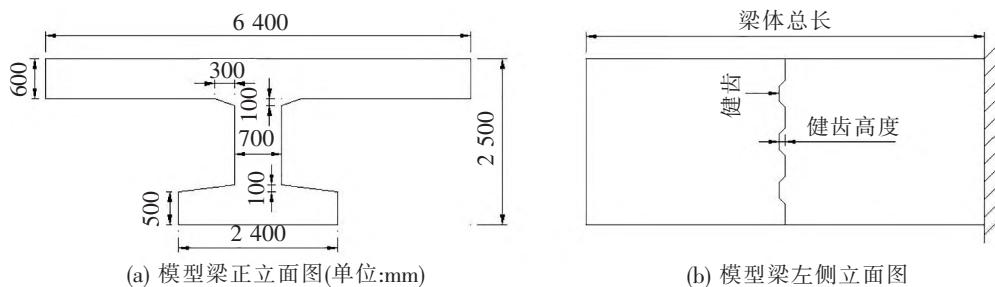


图 7 模型梁截面尺寸图

2.2 胶接缝参数的确定

由于胶接缝中的键齿数量和键齿深度对接缝本身的力学性能影响显著,梁体总长和混凝土强度对节段预制拼装梁整体力学性能影响显著,因此,选择键齿数量、键齿深度、梁体总长和混凝土强度 4 个参数作为变量,探究这 4 个参数对节段预制拼装桥梁抗剪承载力的影响。

在接缝面腹板上设置键齿,键齿沿厚度方向上通长设置,同时结合截面的几何尺寸,在键齿顶面宽度为 50 mm 的情况下确定模型的键齿数量分别为 2、3、4、5、6 个,键齿等间距分布,键齿深度为 35、40、45、50、55 mm,键齿的端部宽度 b 与键齿深度 h 的比值为 1:1。从国内桥梁建设的实际情况来看,适合节段施工的混凝土预制拼装桥梁主要集中在跨径 20~60 m 之间,为使研究具有合理性和适用性,确定模型的梁体总长为 20、30、40、50、60 m,模型中两节段等长。在实际节段预制拼装桥梁的建设工程中,通常会对节段预制拼装桥梁施加预应力,并且根据《混凝土结构耐久性设计规范》,混凝土的强度不得低于 40 MPa,为使研究更贴合实际情况,确定模型的混凝土强度为 C40、C50、C60、C70、C80。

2.3 响应面试验设计

在对节段预制混凝土 T 型梁结构进行抗剪强度分析时,往往会遇到非常复杂的影响结构受力状态的种种不确定性因素,影响这些因素的基本随机变量与功能函数之间存在高度非线性关系。在分析这类复杂结构的可靠度时,由于不能得到明确的功能函数表达式,通常采用响应面法,用一系列确定性试验去拟合一个近似的极限状态曲面,就能构造出某点的近似功能函数。响应面法在确定性分析和可靠性分析间搭起了一座桥梁,它能够较好地常用的可靠度分析方法运用到实际工程结构中。响应面法的基本思想是通过一系列确定性的试验拟合一个响应面来模拟真实的极限状态曲面,建立参数输入与结构响应之间的关系,并将隐式的功能函数显式地表达出来,该方法用简单的显式函数逐步逼近复杂的隐式函数。

响应面法的比较类似于实验室中的经验方法,选择适当的数学函数簇,通过改变参数的具体数值进行分析,最后确定出所选定函数的系数值,就得到了功能函数。这个纯经验的响应面近似拟合技术的关键是在何处用响应面法拟合来替代实际的极限状态曲面,每次拟合的抽样中心极为关键。响应面获得之后,就可以把它作为近似的极限状态曲面来替代复杂模型实际工程结构的极限状态曲面。

利用选定的参数设计 4 因素 5 水平的中心复合试验,选定 4 因素为键齿数量、键齿深度、梁体总长和混凝土强度,每个因子选择 5 水平。建立各参数的有限元模型,并在模型运行完毕后提取端部加载点处的荷载位移曲线,从而得到模型弹性范围内的最大挠度及对应荷载,表 2 为响应面试验的设计及结果。

表 2 响应面试验设计及结果

试验号	键齿数量/个	键齿深度/mm	梁体总长/m	混凝土强度/MPa	最大挠度/mm	弹性极限荷载/kN
1	4	45	40	60	47.847 97	295.975 7
2	5	50	30	50	27.657 55	171.614 1
3	5	50	30	70	26.753 28	388.995 7
4	4	45	40	80	47.363 05	293.727 7
5	6	45	40	60	47.613 33	295.139 3
6	4	55	40	60	42.734 38	265.173 1
7	3	50	30	70	38.515 63	539.796 9
8	2	45	40	60	71.437 60	425.622 4
9	4	45	40	40	71.384 81	425.569 5
10	3	40	30	70	36.406 25	510.405 3
11	4	35	40	60	70.288 09	419.615 2
12	5	40	30	70	39.306 64	550.795 7
13	5	40	50	50	103.906 30	319.370 8
14	5	40	50	70	108.652 30	333.701 3
15	4	45	20	60	16.250 00	747.571 8
16	3	50	30	50	39.603 27	554.825 6
17	3	50	50	50	109.097 30	334.942 8
18	3	40	50	70	105.764 70	346.812 3
19	5	50	50	50	110.249 60	338.079 9
20	3	40	30	50	91.250 00	280.414 8
21	3	40	50	50	109.764 70	336.812 3
22	5	50	50	70	108.652 30	333.704 8
23	3	50	50	70	101.906 30	329.323 1
24	4	45	60	60	151.367 20	269.902 6
25	5	40	30	50	38.515 63	539.871 4

2.4 响应面回归方程的建立及显著性结果分析

对表 2 中的数据进行分析,建立节段预制胶接缝混凝土 T 型梁的弹性极限荷载及其对应挠度的多元回归模型。为方便表达,以 A 、 B 、 C 、 D 分别代表参数键齿数量、键齿深度、梁体总长、混凝土强度等级,以 Y_1 、 Y_2 分别代表弹性极限荷载和端部最大挠度。可以拟合得到的 Y_1 、 Y_2 与 A 、 B 、 C 、 D 之间的二次多项回归方程为

$$Y_1 = 1\,410.22 + 243.61A - 9.44B - 51.390C - 3.2D - 9.94AB + 1.319AC + 0.11AD + 0.282BC - 0.09BD - 0.268CD + 15.31A^2 + 0.43B^2 + 0.524\,0C^2 + 0.15D^2 \quad (10)$$

$$Y_2 = 1\,378.28 - 108.19A - 23.59B - 13.193C - 11.26D + 0.46AB + 0.495AC + 0.438AD + 0.093BC + 0.05BD + 0.031CD + 4.57A^2 + 0.15B^2 + 0.106\,4C^2 + 0.04D^2 \quad (11)$$

由表 3 可知,该节段预制胶接缝混凝土 T 型梁弹性极限承载力模型的 $F = 2.65$, $P = 0.035\,7$,表明该回归方程的差异显著。 R^2 为 $0.911\,8$,说明该方程与对应的响应值吻合程度能够达到 91.18% 。此外,由 F 检验可知影响节段预制胶接缝混凝土 T 型梁弹性极限承载力的主次因素为梁体总长>键齿深度>键齿数量>混凝土强度。

表 3 弹性极限承载力响应面回归方程的方差分析

来源	平方和	自由度	均方和	F 值	P 值
模型	2.98E + 05	14	21\,315.62	2.650\,0	0.035\,7
A	11\,187.32	1	11\,187.32	1.390\,0	0.256\,9
B	11\,961.06	1	11\,961.06	1.490\,0	0.241\,8
C	1.38E + 05	1	1.38E + 05	17.130\,0	0.000\,9
D	1\,566.87	1	1\,566.87	0.194\,6	0.665\,4
AB	39\,579.94	1	39\,579.94	4.910\,0	0.042\,5
AC	2\,786.05	1	2\,786.05	0.346\,0	0.565\,2
AD	22.37	1	22.37	0.002\,8	0.958\,7
BC	3\,181.22	1	3\,181.22	0.395\,0	0.539\,1
BD	332.03	1	332.03	0.041\,2	0.841\,8
CD	11\,498.91	1	11\,498.91	1.430\,0	0.250\,7
A^2	6\,436.04	1	6\,436.04	0.799\,2	0.385\,5
B^2	3\,212.03	1	3\,212.03	0.398\,8	0.537\,2
C^2	75\,333.18	1	75\,333.18	9.350\,0	0.008\,0
D^2	6\,283.12	1	6\,283.12	0.780\,2	0.391\,0
残差	1.21E + 05	15	8\,053.25	—	—
总误差	4.19E + 05	29	—	—	—

由表 4 可知,该节段预制胶接缝混凝土 T 型梁弹性阶段端部最大挠度模型的 $F = 26.05$, $P < 0.000\,1$,表明该回归方程的差异极显著。 R^2 为 $0.960\,5$,说明该方程与对应的响应值吻合程度能够达到 96.05% 。此外,由 F 检验可知影响节段预制胶接缝混凝土 T 型梁弹性阶段端部最大挠度的主次因素为梁体总长>键齿深度>键齿数量>混凝土强度。

表 4 弹性阶段端部最大挠度响应面回归方程的方差分析

来源	平方和	自由度	均方和	F 值	P 值
模型	32 799.23	14	2 342.80	26.050 0	<0.000 1
A	563.21	1	563.21	6.260 0	0.024 4
B	664.01	1	664.01	7.380 0	0.015 9
C	26 018.63	1	26 018.63	289.300 0	<0.000 1
D	523.88	1	523.88	5.830 0	0.029 0
AB	85.54	1	85.54	0.951 1	0.344 9
AC	384.84	1	384.84	4.280 0	0.056 3
AD	307.63	1	307.63	3.420 0	0.084 2
BC	349.37	1	349.37	3.880 0	0.067 5
BD	113.03	1	113.03	1.260 0	0.279 9
CD	144.01	1	144.01	1.600 0	0.225 0
A ²	574.58	1	574.58	6.390 0	0.023 2
B ²	400.95	1	400.95	4.460 0	0.051 9
C ²	3 109.68	1	3 109.68	34.580 0	<0.000 1
D ²	565.11	1	565.11	6.280 0	0.024 2
残差	1 349.04	15	89.94	—	—
总误差	34 148.27	29	—	—	—

2.5 参数交互作用及影响分析

键齿数量、键齿深度、梁体总长和混凝土强度对节段预制胶接缝混凝土 T 型梁弹性极限承载力的响应面图和等高线图见图 8。由图 8 可知,键齿数量和键齿深度的等高线以及梁体总长和混凝土强度的等高线较为密布,可知这些因素之中的交互作用较明显,对节段预制胶接缝混凝土 T 型梁弹性极限承载力有很大的影响。

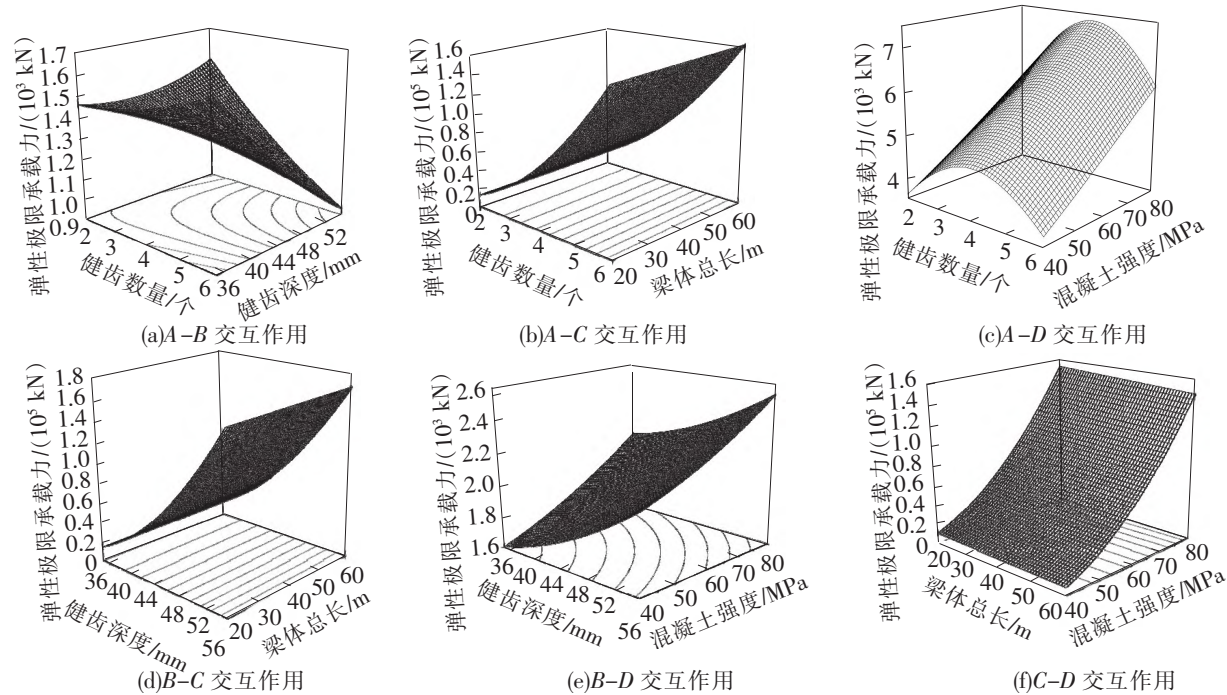


图 8 2 因素对节段预制胶接缝混凝土 T 型梁弹性极限承载力的交互影响

键齿数量、键齿深度、梁体总长和混凝土强度对节段预制胶接缝混凝土 T 型梁弹性阶段端部最大挠度的响应面图和等高线图见图 9。由图 9 可知,键齿数量和梁体总长的等高线以及键齿深度和梁体总长的等高线较为密布,可知这些因素之中的交互作用较明显,对节段预制胶接缝混凝土 T 型梁弹性阶段端部最大挠度有很大的影响。

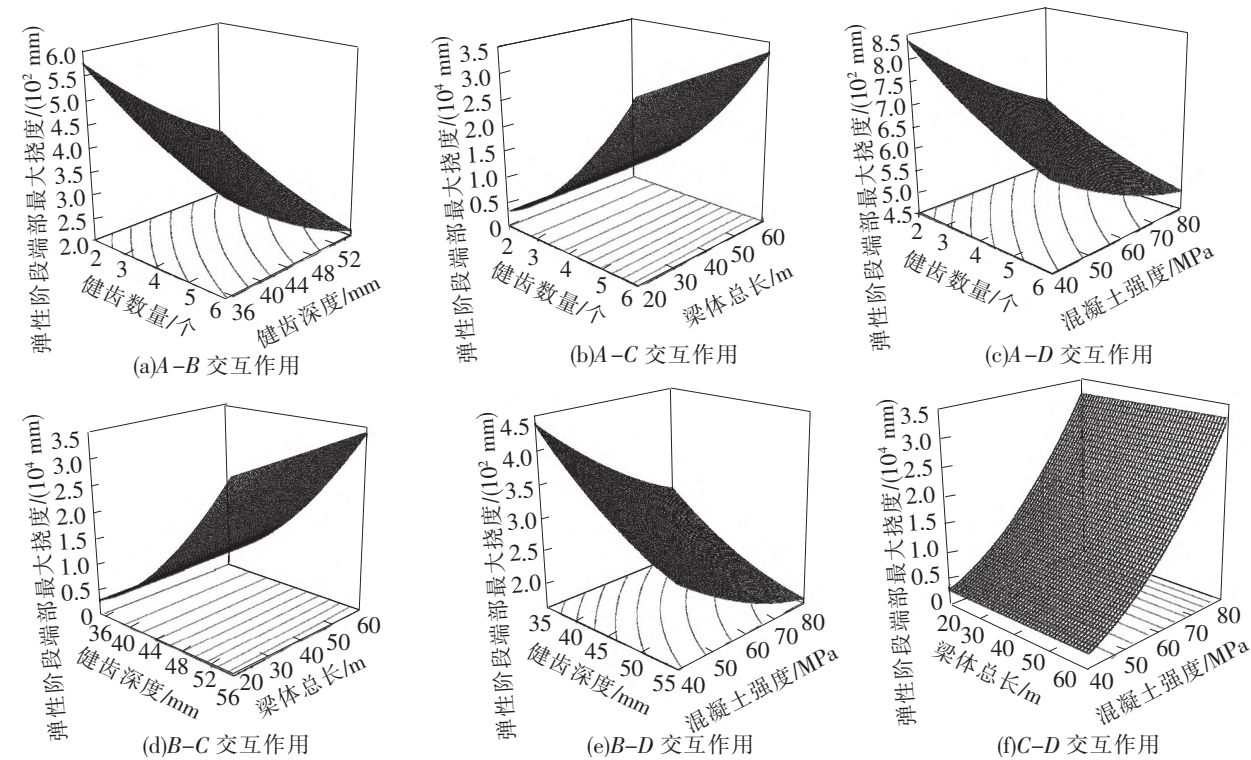


图 9 2 因素对节段预制胶接缝混凝土 T 型梁弹性阶段端部最大挠度的交互影响

2.6 响应面回归方程验证

为了验证响应面模型的精度,选用了 2 组没有出现在中心复合试验设计中的参数。利用有限元软件将以上 2 组参数进行仿真模拟,得到的仿真结果与响应面预测的结果进行对比,如表 5 所示。

表 5 预测结果与仿真结果对比

键齿 数量/个	键齿 深度/mm	梁体 总长/m	混凝土 强度/MPa	弹性极限承载力			弹性阶段端部最大挠度		
				预测值/ kN	仿真值/ kN	相对 误差/%	预测值/ mm	仿真值/ mm	相对 误差/%
4	50	40	70	303.132 5	317.369 2	4.5	48.936 2	50.793 9	3.7
5	55	50	60	206.867 0	220.794 6	6.3	114.802 2	121.176 9	5.3

根据表 5 的对比可知,响应面模型预测的结果与实际的仿真结果误差均在 7% 以内,精度较高。

3 结论

以节段预制混凝土 T 型梁为研究对象,在进行了有限元模型验证的基础上,分析了不同参数对于节段预制混凝土 T 型梁抗剪性能影响规律的影响,采用响应面法对结构进行分析,得到如下主要结论:

- (1)有限元分析结果与试验结果吻合良好,说明选用的混凝土塑性损伤模型,接触关系及边界条件是合适的。
- (2)对节段预制胶接缝混凝土 T 型梁的参数进行响应面回归分析时,选用四元二次式的响应面回归方程可以较为准确地表达各参数与其弹性极限承载力和端部挠度的关系,根据仿真与实际结果对比,误差均在 7% 以内。

(3)节段预制胶接缝混凝土 T 型梁的参数响应面回归模型对于梁体总长的敏感性最高,对于混凝土强度的敏感性最低。并且,对于键齿深度的敏感性要高于键齿数量的敏感性。相较于一个参数对于节段预制胶接缝混凝土 T 型梁抗剪性能的影响,2 个参数共同改变时对于其抗剪性能的影响也比较大,在实际设计时应予以考虑。

参 考 文 献

- [1]AHMED G H, AZIZ O Q. Stresses, deformations and damages of various joints in precast concrete segmental box girder bridges subjected to direct shear loading[J]. Engineering Structures, 2020,206:1-16.
- [2]AHMED G H, AZIZ O Q. Shear behavior of dry and epoxied joints in precast concrete segmental box girder bridges under direct shear loading[J]. Engineering Structures, 2019,182:89-100.
- [3]WRAYOSH W A, HASHIM A H. Flexural behavior of box segmental beams with internal Tendons subjected to repeated and static loads[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020,671(1):1-7.
- [4]KIM H S, CHIN W J, CHO J R, et al. An experimental study on the behavior of shear keys according to the curing time of UHPC[J]. Engineering, 2015,7(4):212-218.
- [5]袁爱民,符俊冬,程磊科,等.节段预制桥梁胶接缝配筋剪力键剪切性能试验[J].中国公路学报,2018,31(12):81-87.
- [6]卢文良,马晓蕾,郑强.节段预制胶拼构件胶接缝厚度研究[J].铁道建筑,2019,59(8):39-41.
- [7]轩帅飞.超高性能混凝土节段预制拼装梁抗剪强度研究[D].株洲:湖南工业大学,2020.
- [8]ALCALDE M,CIFUENTES H,MEDINA F. Influence of the number of keys on the shear strength of post-tensioned dry joints[J]. Material De Construction, 2013,63:297-307.
- [9]SHAMASS R, ZHOU X, WU Z. Numerical analysis of shear-off failure of keyed epoxied joints in precast concrete segmental bridges [J]. Journal of Bridge Engineering,2016,22(1):1-48.
- [10]蔡东波,侯正宝,江涛,等.混凝土预制节段梁不同厚度胶接缝抗剪试验研究[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2022,45(8):1072-1078.
- [11]李国平.体外预应力混凝土简支梁剪切性能试验研究[J].土木工程学报,2007,40(2):58-63.

Analysis of Shear Performance of Segmental Precast Concrete T-beams Based on Response Surface Method

Wang Zhenyu, Zhao Yucheng, Bu Jianqing

(School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: In this paper, the central composite test and finite element simulation were combined to study the influence of joint parameters on the shear performance of segmental precast concrete T-beams. The influences of the number of shear keys, the depth of shear key, the total length of the beam and the strength of concrete on the shear performance of segment-precast T-beams were investigated, and the corresponding response surface regression analysis was carried out. The results show that the regression equation of the influence of the parameters on the shear performance of segmental precast T-beams are obtained by using the response surface method. The predicted results are in good agreement with the actual results of finite element simulation, and the error is within an acceptable range, which saves the computational cost for the subsequent research. The research content provides a reliable theoretical basis for the design of similar structural bridges.

Key words: segmental precast; numerical modelling; shear performance; response surface method