

## 钢筋桁架叠合板施工阶段参数分析

张俊豪<sup>1,2</sup>,贺君<sup>1\*</sup>,谭超<sup>3</sup>,奉思东<sup>1</sup>,王梓桐<sup>1</sup>

(1.长沙理工大学,湖南长沙 410114;2.中交二公局华西建设有限公司,四川成都 611930;

3.湖南省交通规划勘察设计院有限公司,湖南长沙 410200)

**摘要:**为明确钢筋桁架叠合板在吊装和后浇层浇筑等施工关键阶段的受力性能,该文以格鲁吉亚E60高速公路上某主跨60 m组合梁桥为研究对象,采用ABAQUS建立有限元模型开展施工过程模拟,分析预制底板材料、吊点数量、板厚和钢筋桁架榀数等参数对混凝土主应力和跨中挠度的影响。结果表明:预制底板使用超高性能混凝土(UHPC)材料时,未出现塑性损伤,且能有效提高预制底板刚度;普通混凝土(NC)预制底板宜采用6个及以上吊点进行吊装,而UHPC预制底板则只需使用4个吊点;增加预制底板厚度会增加吊装阶段混凝土最大主应力,但对后浇层浇筑阶段的混凝土最大主应力几乎没有影响;增加预制底板中钢筋桁架榀数可降低吊装阶段中的混凝土最大主应力,后浇层浇筑阶段中混凝土最大主应力及跨中挠度随钢筋桁架榀数的增加而减小。该研究结果可为钢筋桁架叠合板的吊装和后浇层浇筑提供参考,并为UHPC-NC叠合板的实际应用提供支持。

**关键词:**桥梁工程;钢筋桁架叠合板;脱模吊装;后浇层浇筑;超高性能混凝土

中图分类号:U448.216;U443.31

文献标志码:A

### Parametric Analysis of Composite Slab with Steel Bar Trusses at Construction Stages

ZHANG Junhao<sup>1,2</sup>, HE Jun<sup>1\*</sup>, TAN Chao<sup>3</sup>, FENG Sidong<sup>1</sup>, WANG Zitong<sup>1</sup>

(1.Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410114, China; 2. CCCC-SHEC West China Construction

Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 611930, China; 3. Hunan Provincial Communications Planning, Survey &

Design Institute Co., Ltd., Changsha, Hunan 410200, China)

**Abstract:** To clarify the structural behavior of composite slab with steel bar trusses at key construction stages including hoisting and concrete post-pouring, a composite beam bridge with a main span of 60 m in Georgia's E60 Highway was investigated. A finite element model was developed by using ABAQUS to simulate the construction process and analyze the influence of parameters such as prefabricated bottom slab material, number of hoisting points, slab thickness, and number of steel bar trusses on the principal stress of concrete and mid-span deflection. The results indicate that ultra-high-performance concrete (UHPC) prefabricated bottom slabs prevent plastic damage and enhance slab stiffness. Normal concrete (NC) prefabricated bottom slabs should set six or more hoisting points, while UHPC prefabricated bottom slabs require only four hoisting points. Increasing slab thickness can raise the concrete's maximum principal stress at the hoisting stage, but it has a negligible impact at the concrete post-pouring stage. Increasing the number of steel bar trusses in the prefabricated bottom slabs can reduce the concrete's maximum principal stress at the hoisting stage, and both the concrete's maximum principal stress and mid-span deflection decrease at the concrete post-pouring stage with the increase in the number of steel bar trusses. These research findings may provide a reference for the hoisting and concrete post-pouring of composite slabs with steel bar trusses and support the actual application of UHPC-NC composite slabs.

**Keywords:** bridge engineering; composite slab with steel bar truss; demolding and hoisting; concrete post-pouring; ultra-high-performance concrete

收稿日期:2024-09-25(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52378127);湖南省自然科学基金杰出青年基金资助项目(编号:2022JJ10049)

作者简介:张俊豪,男,硕士研究生.E-mail:2079849436@qq.com

\*通信作者:贺君,男,博士,教授.E-mail:hejun@csust.edu.cn

## 0 引言

叠合板由预制底板和后浇混凝土层组成,根据后浇混凝土时是否设置临时支撑,叠合板可分为一次受力叠合板和二次受力叠合板<sup>[1-2]</sup>。二次受力叠合板相较于一次受力叠合板和现浇板,在施工过程中无须设置临时支撑,方便施工期间桥下道路车辆的通行,如图1所示。此外,叠合板的预制底板相较于全预制板吊装方便,同时还可以作为后浇层的模板,施工更为简便,可降低施工成本,缩短工期,缓解施工期间交通拥堵情况<sup>[3]</sup>,在城市中小跨径桥梁中具有广泛的应用前景。



图1 二次受力叠合板与现浇板施工阶段对比

Figure 1 Comparison between secondary stress laminated slabs and cast-in-place slabs at construction stage

二次受力叠合板的预制底板吊装过程中,若底板混凝土强度未达到设计强度便进行脱模吊装,将导致预制底板的表面开裂等问题。在二次受力叠合板的后浇层浇筑时,由于缺乏临时支撑,预制底板需要承受自身重量、施工荷载以及后浇混凝土的湿重,需明确其受力性能是否满足规范要求。

超高性能混凝土(Ultra-High Performance Concrete, UHPC)具有超高强度、超高韧性、超高耐久性等优越性能<sup>[4-5]</sup>。目前,国内外开展了将UHPC运用于叠合结构和加固的理论及应用研究。金陵志等<sup>[6]</sup>、王龙等<sup>[7]</sup>研究了UHPC叠合板的受力性能,推导了钢筋桁架UHPC叠合板抗弯承载力计算公式;张杰等<sup>[8]</sup>提出了UHPC加固钢筋混凝土简支梁的承载力计算方法,结果发现:UHPC加固相对于NC加固,可靠度性能有明显的提升;在一定范围内加固UHPC层厚度对可靠度指标呈正相关提升;张阳等<sup>[9]</sup>研究了UHPC加固RC结构的抗剪性能,试验发现UHPC加固RC构件的界面没有收缩裂缝,加固界面的抗剪承载力与普通混凝土的强度有关;关维溢等<sup>[10]</sup>基于响应面法提出UHPC-NC混合梁设计方案,结果发现采用最佳的设计方案时比原设计的跨中挠度、墩顶弯矩、梁的上下翼缘应力等均有所

减小。

以往研究多集中在使用UHPC进行加固的试验及理论分析,对UHPC-NC叠合结构的吊装、后浇层浇筑等施工关键阶段的受力性能研究较少。本文以格鲁吉亚E60高速公路上某主跨60 m组合梁桥为研究背景<sup>[11]</sup>,结合有限元分析和理论计算,对钢筋桁架二次受力叠合桥面板吊装、后浇层浇筑进行施工过程模拟,并开展参数分析,为钢筋桁架叠合板的施工提供借鉴。

## 1 工程背景及模型建立

### 1.1 工程背景

格鲁吉亚E60高速公路某钢-混组合连续梁桥,跨径布置为(42+60+42) m,上部结构由钢筋桁架叠合桥面板、工字钢梁、横桁杆件、上下平联等组成,如图2所示。钢筋桁架叠合板构造尺寸如图3所示,预制底板与工字钢上翼缘搭接长度为0.1 m。钢筋桁架叠合板总厚度为250 mm,由70 mm预制底板与180 mm后浇层组成。预制底板顺桥向宽1.5 m,横桥向长6.8 m。混凝土的强度等级为C30/37,上弦、下弦、腹杆和附加钢筋均采用B450C钢筋,直径分别为18 mm、12 mm、8 mm和22 mm。

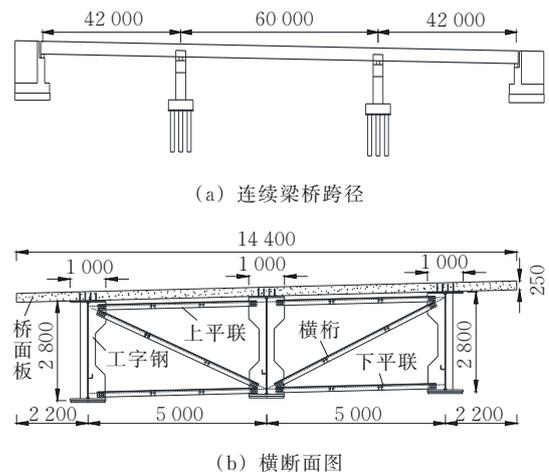


图2 钢-混组合连续梁桥总体布置(单位:mm)

Figure 2 General layout of steel-concrete composite continuous beam bridge (unit: mm)

### 1.2 有限元模型

采用有限元软件ABAQUS模拟钢筋桁架叠合板吊装及后浇层浇筑的施工过程<sup>[12]</sup>。利用三维实体单元C3D8R模拟混凝土,上弦、下弦、腹杆和附加钢筋均采用三维梁单元B31进行模拟。混凝土板网格尺寸为50 mm×50 mm,按厚度方向划分为4层。钢

筋网格尺寸为 50 mm×50 mm。图 4 为考虑预制底板的吊装和后浇层浇筑的有限元模型。

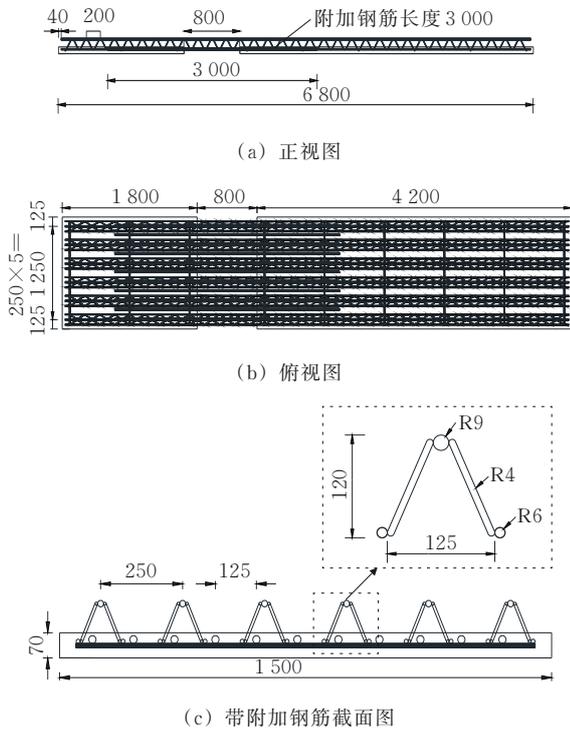


图 3 钢筋桁架叠合板构造 (单位:mm)

Figure 3 Structure of composite slab with steel bar truss (unit:mm)

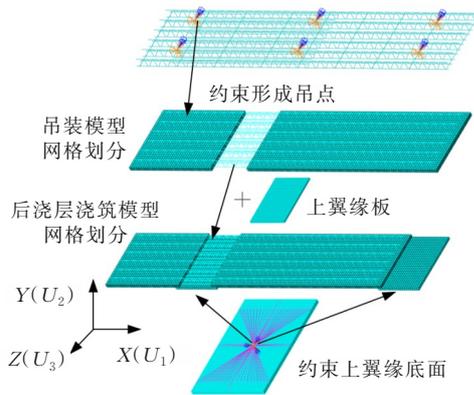


图 4 钢筋桁架叠合板有限元模型

Figure 4 Finite element model of composite slab with steel bar truss

### 1.3 荷载与边界条件

规范中建议,在混凝土立方体抗压强度达到设计值的 75% 时,可进行预制构件的脱模吊装<sup>[13-14]</sup>。脱模吊装时混凝土的抗拉强度标准值 $f'_{tk}$ 可由式(1)、(2)计算<sup>[15]</sup>:

$$f'_{tk} = 0.88 \times 0.395 f'_{cu,k}{}^{0.55} (1 - 1.645\delta)^{0.45} \alpha_{c2} \quad (1)$$

$$f'_{cu,k} = 0.75 \times f_{cu,k} \quad (2)$$

式中: $f'_{tk}$ 为脱模阶段混凝土抗拉强度标准值; $f'_{cu,k}$ 为脱模阶段混凝土立方体抗压强度; $\delta$ 为混凝土抗拉强度变异系数; $\alpha_{c2}$ 为混凝土强度脆性折减系数; $f_{cu,k}$ 为混凝土立方体抗压强度。

由式(1)、(2)可得: $f'_{tk,C30/37} = 1.91 \text{ MPa}$ ,  $f'_{tk,C50} = 2.30 \text{ MPa}$ 。

吊装时等效静力荷载标准值可由式(3)计算,经计算选取预制构件脱模吊装为最不利工况。后浇层浇筑时等效静力荷载标准值可由式(4)计算。荷载以自重与均布荷载形式施加在预制底板。

$$q_{k1} = \max(1.5G_{k1}, 1.2G_{k1} + q_1) \quad (3)$$

$$q_{k2} = G_{k1} + q_2 + G_{k2} \quad (4)$$

式中: $q_{k1}$ 为脱模吊装阶段等效静力荷载标准值; $G_{k1}$ 为预制构件自重标准值; $q_1$ 为脱模吸附力,取 1.5 kN/m<sup>2</sup>; $q_{k2}$ 为施工阶段等效静力荷载标准值; $q_2$ 为施工荷载,取 1 kN/m<sup>2</sup>; $G_{k2}$ 为后浇层自重标准值。

使用内置区域(Embedded Region)嵌入方法模拟钢筋与混凝土的相互作用。工字钢上翼缘与混凝土之间的截面设置为面面接触,切向接触设置为罚函数,摩擦系数 $\mu$ 取 1.5;法向接触设置为硬接触,防止在压应力作用下两种材料互相侵入。

如图 4 所示,按照吊点设计位置,约束相应的钢筋桁架节点自由度  $U_1=U_2=U_3=0$ 、 $U_{R3}=0$ ,形成铰节点以模拟吊点。在后浇层浇筑模型中,工字钢上翼缘底面设置参考点,将其与工字钢腹板和加筋处的位置进行耦合,约束参考点自由度  $U_1=U_2=U_3=0$ 、 $U_{R1}=U_{R2}=U_{R3}=0$ 。

### 1.4 材料本构

混凝土考虑塑性损伤,采用 CDP (Concrete Damaged Plasticity Model) 模型,相关参数见表 1。NC 的拉、压本构参考规范[14],UHPC 拉压应力-应变曲线参考文献[16-19],如图 5 所示。钢筋采用双折线弹塑性模型。

表 1 CDP 模型参数取值

Table 1 CDP model parameter values

膨胀角 $\psi/(^\circ)$	偏心率 $\epsilon$	$f_{b0}/f_{c0}$	$K$	$\mu$
30	0.1	1.16	0.666 7	0.000 5

注: $f_{b0}/f_{c0}$ 为混凝土双轴抗压强度与单轴抗压强度比值; $K$ 为沿拉压子午线的强度比值; $\mu$ 为黏度系数。

图 5 中: $y = \sigma_c/f_c$ ,  $\sigma_c$ 为混凝土受压应力, $f_c$ 为棱柱体轴心抗压强度,取 128.4 MPa; $A = E_c \epsilon_{cu}/f_c$ ,  $E_c$ 为 UHPC 弹性模量,  $\epsilon_{cu}$ 为峰值压应变; $x = \epsilon/\epsilon_{cu}$ ,  $\epsilon$ 为混

凝土受压应变; $\sigma_t$ 为混凝土受拉应力; $f_{ct}$ 为UHPC抗拉强度; $\epsilon$ 为混凝土受拉应变; $\epsilon_{ct}$ 为弹性阶段峰值应变; $\epsilon_{pc}$ 为应变软化段开始时应变。

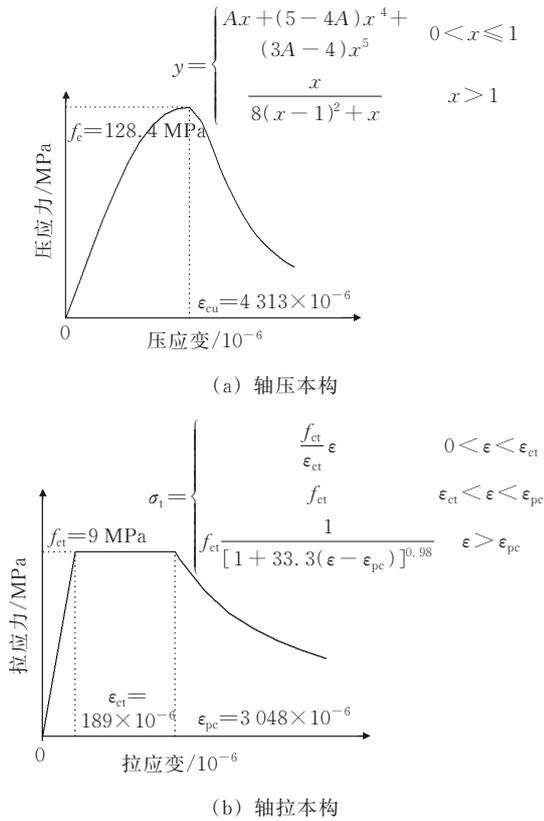


图5 UHPC拉压本构模型

Figure 5 UHPC tensile and compressive constitutive model

1.5 模拟工况及参数

综合考虑吊装的经济性和钢筋桁架叠合板的受力性能,以底板材料(C30/37、C50和UHPC)、吊点数量(4、6、8)、钢筋桁架槓数(0、2、4、6)和底板厚度(60 mm、70 mm、80 mm)为参数,研究其对预制底板吊装、后浇层浇筑过程的受力性能影响,如表2、图6所示。

表2 钢筋桁架叠合板施工阶段参数

Table 2 Parameters of composite slab with steel bar truss at construction stage

组号	预制底板板厚/mm	钢筋桁架槓数	吊点个数/个
1	70	6	4
2	70	6	6
3	70	6	8
4	60	6	6
5	80	6	6
6	70	0	6
7	70	2	8
8	70	4	4

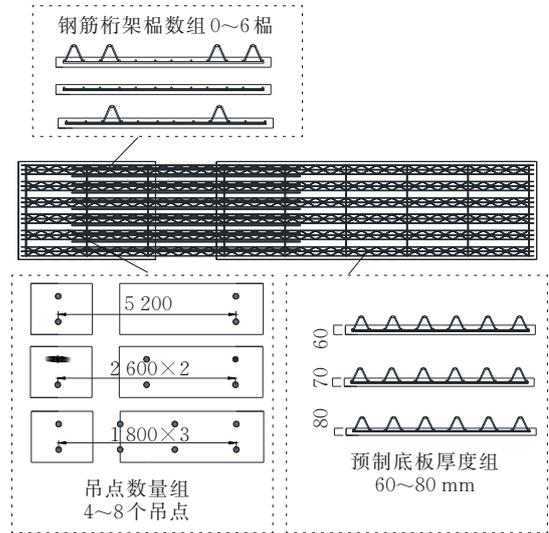


图6 施工阶段工况设置(单位:mm)

Figure 6 Construction stage working condition(unit:mm)

2 吊装阶段模拟结果

2.1 吊点数量影响

3种吊点布置方案分别为(800+5 200+800) mm、(800+2×2 600+800) mm、(800+3×1 800+800) mm,如图6所示。不同吊点布置方案混凝土主应力及桁架钢筋应力计算结果如表3所示。

表3 吊装阶段不同吊点数量预制底板混凝土和钢筋应力

Table 3 Concrete and reinforcement stress of prefabricated bottom slab with different numbers of hoisting points at hoisting stage

底板材料	$f'_{tk}/\text{MPa}$	不同吊点数量(个)的应力/MPa					
		混凝土最大主应力 $\sigma_{1,max}$			桁架钢筋应力		
		4	6	8	4	6	8
C30/37	1.91	2.34	1.14	0.78	152.03	57.68	38.90
C50	2.30	2.72	1.16	0.80	152.71	57.36	38.77
UHPC	9.00	3.40	1.33	0.91	162.55	59.69	40.74

图7为吊装阶段不同吊点数量预制底板(C30/37)主应力分布。混凝土最大主应力 $\sigma_{1,max}$ 位于吊点下方底板处,桁架钢筋最大应力位于吊点位置下方腹杆钢筋处。随着吊点数量的增加,混凝土最大主应力 $\sigma_{1,max}$ 逐渐减小。当 $f'_{tk} < \sigma_{1,max}$ 时混凝土易产生开裂风险<sup>[14-15]</sup>。对于C30/37预制底板,4吊点吊装时, $\sigma_{1,max}/f'_{tk,C30/37}$ 为1.23;6吊点吊装时,3种材料的 $\sigma_{1,max} < f'_{tk}$ ;吊点数量从4增加到8时, $\sigma_{1,max}$ 减小66.7%,桁架钢筋最大应力从152.03 MPa减小到38.90 MPa。NC预制底板脱模吊装过程中不宜选用

4吊点,存在预制底板开裂的风险。对于横向宽度 1.5 m、纵向长度 6.8 m 的 NC 预制底板,建议选用 6 吊点以上进行脱模吊装。

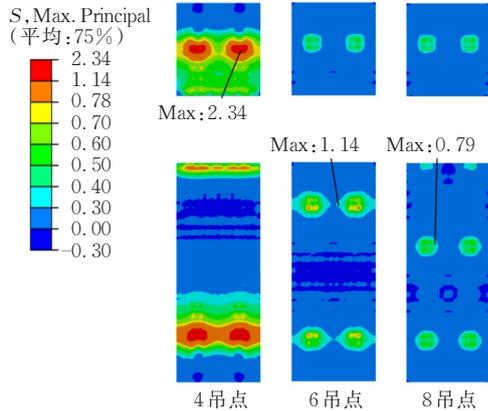


图 7 不同吊点数量预制底板(C30/37)主应力分布(单位:MPa)

Figure 7 Principal stress distribution of prefabricated bottom slab (C30/37) with different numbers of hoisting points(unit:MPa)

对于 UHPC 预制底板,采用 4 吊点吊装时,预制底板主应力最大,混凝土主应力云图如图 8 所示,  $\sigma_{1,max}$  为 3.40 MPa,但  $\sigma_{1,max}/f'_{tk,UHPC}$  仅为 0.38,说明 4 吊点脱模吊装方案可行。因此,UHPC 预制底板可采用少(4个)吊点方案,从而提高吊装效率。

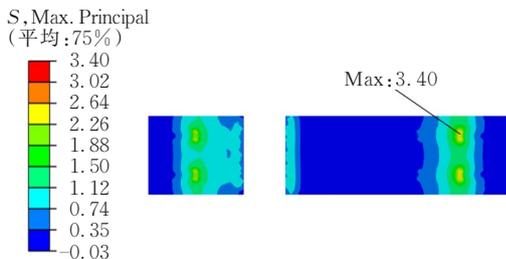


图 8 4吊点预制底板(UHPC)主应力分布(单位:MPa)

Figure 8 Principal stress distribution of prefabricated bottom slab (UHPC) with four hoisting points(unit:MPa)

2.2 板厚影响

吊装阶段不同板厚预制底板混凝土主应力及桁架钢筋应力计算结果如表 4 所示。图 9 仅给出吊装阶段不同厚度预制底板(C30/37)主应力分布。随着板厚的增加,混凝土最大主应力  $\sigma_{1,max}$  逐渐增大。以 C30/37 预制底板为例,当板厚由 60 mm 增加到 80 mm 时,  $\sigma_{1,max}$  增加 0.30 MPa,提升了 28.0%,桁架钢筋应力从 53.31 MPa 增加到 62.49 MPa。60~80 mm 厚

的 UHPC 预制底板,  $\sigma_{1,max}$  低于抗拉强度标准值  $f'_{tk}$ 。因此,在考虑后浇层浇筑和正常使用阶段的情况下,可适当减小预制底板的厚度。

表 4 吊装阶段不同厚度预制底板混凝土和钢筋应力  
Table 4 Concrete and reinforcement stress of prefabricated bottom slab with different thicknesses at hoisting stage

底板材料	$f'_{tk}/$ MPa	不同预制底板厚度(mm)的应力/MPa					
		混凝土最大主应力 $\sigma_{1,max}$			桁架钢筋最大应力		
		60	70	80	60	70	80
C30/37	1.91	1.07	1.14	1.37	53.31	57.68	62.49
C50	2.30	1.07	1.16	1.39	53.38	57.36	62.13
UHPC	9.00	1.13	1.33	1.57	56.56	59.69	64.75

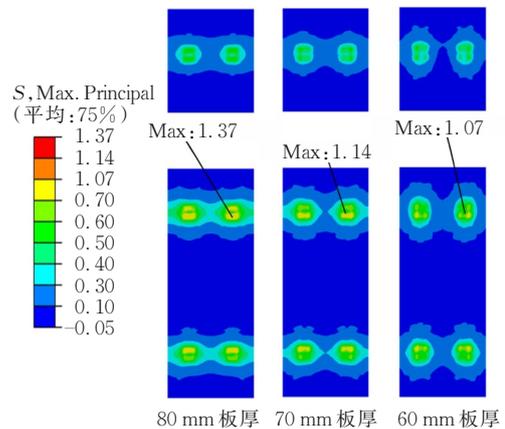


图 9 吊装阶段不同厚度预制底板(C30/37)主应力分布(单位:MPa)

Figure 9 Principal stress distribution of prefabricated bottom slab (C30/37) with different thicknesses at hoisting stage(unit:MPa)

2.3 钢筋桁架榑数影响

吊装阶段不同钢筋桁架榑数预制底板混凝土主应力及桁架钢筋应力计算结果如表 5 所示。图 10 为吊装阶段不同钢筋桁架榑数预制底板(C30/37)主应力分布。以 C30/37 预制底板为例,混凝土最大主应力  $\sigma_{1,max}$  随着钢筋桁架榑数的增加而减小,因为增加钢筋桁架可增大截面惯性矩,2 榑、4 榑和 6 榑桁架的惯性矩分别为 0 榑桁架惯性矩的 2.03 倍、2.99 倍和 3.91 倍,底板刚度增大,从而降低预制底板应力。

C30/37 预制底板,0 榑钢筋桁架进行吊装时,  $\sigma_{1,max}/f'_{tk,C30/37} > 1$ ; 2 榑钢筋桁架进行吊装时,  $\sigma_{1,max}/f'_{tk,C30/37} < 1$ ,混凝土最大主应力  $\sigma_{1,max}$  减少 0.81 MPa,钢筋桁架从 2 榑增加到 6 榑时  $\sigma_{1,max}$  仅减小了

0.20 MPa,表明过多的钢筋桁架对预制板的受力改善有限,由于增加的钢筋桁架数量导致预制底板的有效受压面积减少<sup>[20]</sup>。UHPC预制底板,0榀钢筋桁架吊装时,混凝土最大主应力 $\sigma_{1,max}$ 为2.27 MPa, $\sigma_{1,max}/f_{tk,UHPC}=0.25$ ,说明即使不布置钢筋桁架,也可以完成吊装。

表5 吊装阶段不同榀数的钢筋桁架预制底板混凝土和钢筋应力

Table 5 Concrete and reinforcement stress of prefabricated bottom slab with different numbers of steel bar truss at hoisting stage

底板材料	$f_{tk}/MPa$	不同钢筋桁架榀数时的应力/MPa							
		混凝土最大主应力 $\sigma_{1,max}$				桁架钢筋最大应力			
		0	2	4	6	0	2	4	6
C30/37	1.91	2.15	1.34	1.23	1.14	86.38	60.55	60.80	57.68
C50	2.30	2.16	1.36	1.25	1.16	85.53	60.16	60.29	57.36
UHPC	9.00	2.27	1.56	1.43	1.33	87.06	60.29	62.05	59.69

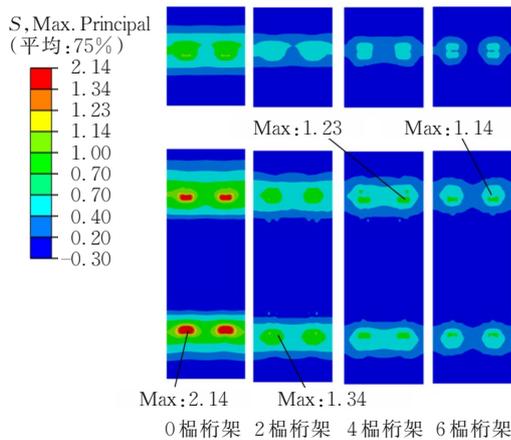


图10 吊装阶段不同钢筋桁架榀数预制底板(C30/37)主应力分布(单位:MPa)

Figure 10 Principal stress distribution of prefabricated bottom slab (C30/37) with different numbers of steel bar truss at hoisting stage (unit: MPa)

### 3 后浇层施工模拟结果

#### 3.1 浇筑顺序影响

原方案后浇层混凝土的浇筑分为两个阶段,如图11所示。阶段1:进行跨内后浇层浇筑;阶段2:进行悬臂板后浇层浇筑。本文采用一次浇筑,可缩短养护时间,避免分阶段浇筑混凝土龄期差异,降低收缩徐变不一致带来的开裂风险。与分阶段浇筑相比,一次浇筑跨中最大弯矩减小9.28 kN·m,

降低27.4%,后续分析基于一次浇筑进行参数优化。

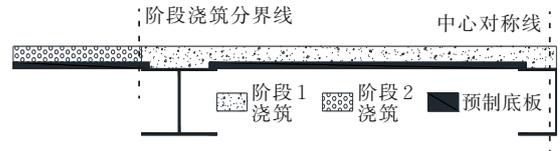


图11 后浇层分阶段浇筑

Figure 11 Staged concrete post-pouring

#### 3.2 板厚影响

后浇层浇筑模拟中,钢筋桁架叠合板的总厚(250 mm)保持不变。有限元法和理论计算结果如表6所示,图12为后浇层浇筑阶段不同厚度预制底板(C30/37)主应力分布。混凝土最大主应力随着板厚的增加基本不变。图13为后浇层浇筑阶段不同预制底板厚度 $\sigma_{2,max}$ 和挠度变化。表6中预制底板最大弯矩处混凝土正应力 $\sigma_3$ 计算如式(8)所示:

$$\sigma_3 = \frac{My}{I_0} \quad (8)$$

式中: $M$ 为弯矩标准值; $y$ 为混凝土翼缘至形心高度; $I_0$ 为预制底板截面惯性矩。

表6 后浇层浇筑阶段不同厚度预制底板计算结果

Table 6 Calculation results of prefabricated bottom slabs with different thicknesses at concrete post-pouring stage

板厚 $t_1$ /mm	底板材料	$f_{tk}/MPa$	$\sigma_{2,max}/MPa$	$\sigma_3/MPa$	弹性刚度 $EI_0/(N \cdot m^2)$	挠度 $l/mm$
60	C30/37	2.28	2.33	6.56	5.09	4.21
	C50	2.64	2.67	6.82	5.19	4.12
	UHPC	9.00	3.87	8.18	5.65	3.95
70	C30/37	2.28	2.33	6.67	5.33	3.98
	C50	2.64	2.67	6.91	5.47	3.88
	UHPC	9.00	3.81	8.23	6.13	3.69
80	C30/37	2.28	2.33	6.69	5.68	3.88
	C50	2.64	2.67	6.93	5.88	3.77
	UHPC	9.00	3.85	8.17	6.78	3.51

由表6可知:预制底板厚度为70 mm时, $\sigma_{3,UHPC}/\sigma_{3,C30/37}=1.23$ ; $\sigma_{3,UHPC}/\sigma_{3,C50}=1.19$ 。以预制底板(C30/37)为例,板厚为60~80 mm时, $\sigma_{2,max}/f_{tk,C30/37}>1$ , $\sigma_{2,max}$ 为后浇层浇筑阶段预制底板跨中区域的最大主应力值, $f_{tk}$ 为混凝土抗拉强度标准值,此时预制底板存在开裂风险。UHPC预制底板中 $\sigma_{2,max}<4$  MPa,远小于UHPC抗拉强度 $f_{tk,UHPC}$ (9 MPa),说明UHPC预制底板在施工阶段仍处于弹性阶段。

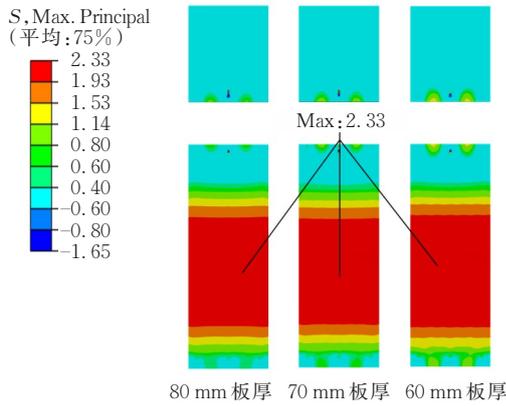


图12 后浇层浇筑阶段不同厚度预制底板(C30/37)主应力分布(单位:MPa)

Figure 12 Principal stress distribution of prefabricated bottom slab (C30/37) with different thicknesses at concrete post-pouring stage (unit:MPa)

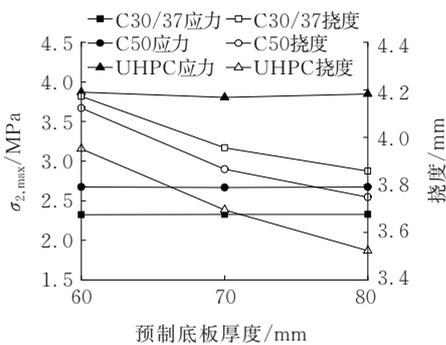


图13 后浇层浇筑阶段不同预制底板厚度  $\sigma_{2,max}$  和挠度变化  
Figure 13 Variation of  $\sigma_{2,max}$  and deflection for prefabricated bottom slabs with different thicknesses at concrete post-pouring stage

由图13可知:预制底板跨中挠度随预制底板厚度的增加而降低,增加预制底板厚度可提高预制底板的弹性刚度  $EI_0$ 。80 mm厚预制底板(C30/37)弹性刚度最大,分别为板厚70 mm与60 mm的1.07倍和1.12倍。预制底板从60 mm增加到80 mm时,跨中挠度降低了7.8%。在相同板厚情况下,UHPC预制底板具有最大的刚度和最小的跨中挠度。因此,施工阶段使用UHPC预制底板可提高刚度,避免挠度过大。

### 3.3 钢筋桁架榑数影响

后浇层浇筑阶段,不同钢筋桁架榑数的叠合板受力性能有限元和理论计算结果如表7所示。图14为后浇层浇筑阶段不同钢筋桁架榑数预制底板(C30/37)主应力分布。图15为后浇层浇筑阶段不

同钢筋桁架榑数  $\sigma_{2,max}$  和挠度变化情况。在NC材料的预制底板中,  $\sigma_{2,max}$  与钢筋桁架榑数并无明显规律,这是因为钢筋桁架腹杆使得其区域内混凝土处于多向受力状态<sup>[20]</sup>。UHPC预制底板中混凝土最大主应力均小于其抗拉强度,说明UHPC底板仍处于弹性阶段,  $\sigma_{2,max,UHPC}$  随预制底板桁架数量增多而减小,增加钢筋桁架数量可有效降低混凝土最大主应力。

表7 后浇层浇筑阶段不同榑数的钢筋桁架预制底板计算结果

Table 7 Calculation results of prefabricated bottom slabs with different numbers of steel bar truss at concrete post-pouring stage

钢筋桁架榑数	底板材料	$f_{ik}/$ MPa	$\sigma_{2,max}/$ MPa	$\sigma_3/$ MPa	弹性刚度 $EI_0/(N \cdot m^2)$	挠度 $l/mm$
0	C30/37	2.28	2.64	20.14	1.40	9.38
	C50	2.64	2.90	20.13	1.50	9.33
	UHPC	9.00	6.09	20.65	2.05	8.47
2	C30/37	2.28	2.31	11.07	2.77	7.16
	C50	2.64	3.25	11.41	2.89	7.01
	UHPC	9.00	5.37	13.10	3.45	6.31
4	C30/37	2.28	2.36	8.14	4.08	5.15
	C50	2.64	2.75	8.45	4.20	4.99
	UHPC	9.00	4.54	9.99	4.79	4.67
6	C30/37	2.28	2.33	6.67	5.33	3.98
	C50	2.64	2.67	6.91	5.47	3.88
	UHPC	9.00	3.81	8.23	6.13	3.69

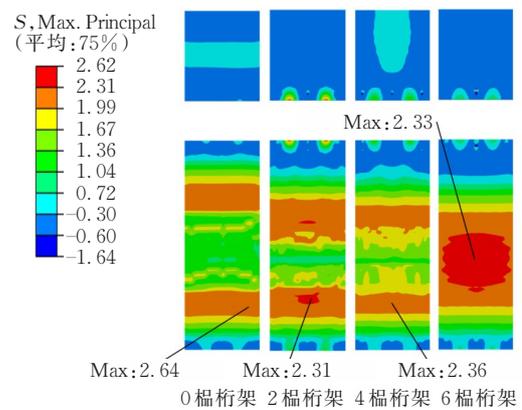


图14 不同钢筋桁架榑数预制底板(C30/37)主应力分布(单位:MPa)

Figure 14 Principal stress distribution of prefabricated bottom slab (C30/37) with different numbers of steel bar truss (unit:MPa)

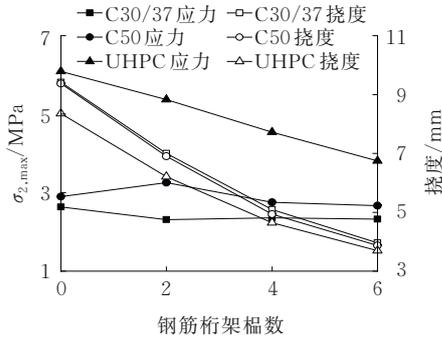


图 15 后浇层浇筑阶段不同钢筋桁架榑数  $\sigma_{2,max}$  和挠度变化情况

Figure 15 Variation of  $\sigma_{2,max}$  and deflection for different numbers of steel bar truss at concrete post-pouring stage

由表 7 及图 15 可知: 预制底板跨中挠度随钢筋桁架榑数的增加而减小。以预制底板(C30/37)为例, 钢筋桁架从 0 榑增加到 6 榑, 跨中挠度降低了 58.0%, 增加预制底板中的钢筋桁架榑数可有效提高预制底板弹性刚度。相同钢筋桁架榑数, UHPC 预制底板的跨中挠度最小, 弹性阶段刚度最大。

#### 4 结论

本文以格鲁吉亚 E60 高速公路某组合桥梁为背景, 通过建立有限元模型开展叠合板施工过程中不同材料及厚度等参数分析, 揭示了吊装和后浇层浇筑中预制底板材料、吊点数量、浇筑顺序、钢筋桁架数量和预制底板厚度对叠合板受力性能影响规律, 具体结论如下:

(1) UHPC 底板中  $\sigma_{1,max}/f_{tk,UHPC}$  和  $\sigma_{2,max}/f_{tk,UHPC}$  小于 0.7, UHPC 处于弹性阶段。UHPC 底板的受力性能优于 NC 底板的, 且可以减少吊点数量, 并可降低叠合板的厚度和用钢量。

(2) 在吊装阶段, 增加钢筋桁架的数量可以降低混凝土的最大主应力; 但预制底板的厚度增加会导致最大主应力相应增加。

(3) 在后浇层浇筑阶段, 采用一次浇筑的方式能减少跨中弯矩值。增加钢筋桁架能提高预制底板的弹性刚度。混凝土的最大主应力随着预制底板厚度的增加基本保持不变, 但跨中挠度会随着预制底板厚度的增加而减小。

本文仅对吊装和后浇层浇筑阶段进行了有限元模拟。后续将继续开展预制 UHPC-后浇 NC 的界面黏结性能试验和 UHPC-NC 钢筋桁架叠合板的弯曲

性能试验, 为 UHPC-NC 钢筋桁架叠合板的实际应用提供试验验证。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] 周旺华. 现代混凝土叠合结构[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998.  
ZHOU Wanghua. Modern concrete composite structure [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1998.
- [2] 朱惠诚, 何山清, 彭英, 等. 旧桥改造中预应力混凝土叠合构件的分析[J]. 中外公路, 2003, 23(2): 46-49.  
ZHU Huicheng, HE Shanqing, PENG Ying, et al. Analysis of prestressed concrete composite members in old bridge reconstruction[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2003, 23(2): 46-49.
- [3] 于敬海, 何梦杰, 张树辉, 等. 二阶段受力作用下预应力混凝土钢管桁架叠合板受力性能试验研究[J]. 建筑结构, 2021, 51(5): 80-85.  
YU Jinghai, HE Mengjie, ZHANG Shuhui, et al. Experimental study on the mechanical behavior of prestressed concrete steel pipe truss composite slabs under the influence of secondary force[J]. Building Structure, 2021, 51(5): 80-85.
- [4] 袁明, 贺文杰, 颜东煌, 等. 超高性能混凝土配合比优化研究[J]. 中外公路, 2019, 39(6): 169-173.  
YUAN Ming, HE Wenjie, YAN Donghuang, et al. Investigation on optimizing mixing ratio of ultra-high performance concrete[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2019, 39(6): 169-173.
- [5] 郭福宽, 周尚猛. 典型正交异性桥面板病害分析与加固技术研究[J]. 中外公路, 2023, 43(3): 134-138.  
GUO Fukuan, ZHOU Shangmeng. Research of disease analysis and reinforcement technology for typical orthotropic bridge deck[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(3): 134-138.
- [6] 金凌志, 廉德铭, 李丽, 等. 钢筋桁架超高性能混凝土叠合板受弯性能试验研究[J]. 工业建筑, 2020, 50(3): 69-75.  
JIN Lingzhi, LIAN Deming, LI Li, et al. Experimental research on flexural behavior of UHPC composite slabs with steel truss[J]. Industrial Construction, 2020, 50(3): 69-75.
- [7] 王龙, 金凌志, 万冬伟. 不同叠合方式超高性能混凝土叠合板受弯性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(增刊 2): 43-51.  
WANG Long, JIN Lingzhi, WAN Dongwei. Experimental study on flexural behavior of UHPC aminated plates with different superimposed surfaces[J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(sup 2): 43-51.
- [8] 张杰, 蔺鹏臻. UHPC 加固钢筋混凝土筒支梁后可靠度分析[J]. 中外公路, 2023, 43(5): 72-77.  
ZHANG Jie, LIN Pengzhen. Reliability analysis of RC

- simply supported beams strengthened by UHPC[J]. *Journal of China & Foreign Highway*,2023,43(5):72-77.
- [9] 张阳,王兴旺. UHPC加固RC结构界面抗剪性能试验研究[J]. *中外公路*,2017,37(2):105-111.  
ZHANG Yang,WANG Xingwang. Experimental study on shear behavior of RC structure interface strengthened by UHPC[J]. *Journal of China & Foreign Highway*,2017,37(2):105-111.
- [10] 关维溢,段璐琦. 基于响应面法的UHPC-NC连续箱梁桥优化设计[J]. *中外公路*,2023,43(3):76-82.  
GUAN Weiyi,DUAN Luqi. Optimization design of UHPC-NC continuous box girder bridge based on response surface method[J]. *Journal of China & Foreign Highway*,2023,43(3):76-82.
- [11] 谭超,李文武,熊先勇,等. 基于欧洲规范的组合梁叠合桥面板横向受力分析[J]. *世界桥梁*,2023,51(4):1-7.  
TAN Chao,LI Wenwu,XIONG Xianyong, et al. Transverse mechanical property of composite deck system consisting of steel trusses and precast concrete slabs together with a cast-in-situ layer[J]. *World Bridges*,2023,51(4):1-7.
- [12] 田赫. 装配式钢筋桁架叠合楼板常见问题及改进方案浅析[J]. *建筑结构*,2022,52(增刊1):1732-1737.  
TIAN He. Analysis of common problems and girders lattice with slabs improvement scheme of prefabricated composite[J]. *Building Structure*,2022,52(sup 1):1732-1737.
- [13] 住房和城乡建设部. 装配式混凝土结构技术规程:JGJ 1—2014[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2014.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical specification for precast concrete structures:JGJ 1—2014[S]. Beijing:China Architecture & Building Press,2014.
- [14] 中国建筑科学研究院. 混凝土结构设计规范:GB 50010—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.  
China Academy of Building Research. Code for design of concrete structures: GB 50010—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press,2010.
- [15] 罗翔,刘恩,周冰凌,等. 基于ABAQUS有限元分析的大跨度钢筋桁架混凝土叠合板脱模吊装阶段吊点合理布置研究[J]. *建筑结构*,2022,52(增刊2):2894-2902.  
LUO Xiang,LIU En,ZHOU Bingling, et al. Research on reasonable layout of lifting points for long-span steel truss concrete composite slab in stripping and hoisting based on ABAQUS[J]. *Building Structure*,2022,52(sup 2):2894-2902.
- [16] 马亚峰. 活性粉末混凝土(RPC 200)单轴受压本构关系研究[D]. 北京:北京交通大学,2006.  
MA Yafeng. Study on constitutive relationship of 200 MPa reactive powder concrete under uni-axial compression[D]. Beijing:Beijing Jiaotong University,2006.
- [17] 管品武,涂雅箏,张普,等. 超高性能混凝土单轴拉压本构关系研究[J]. *复合材料学报*,2019,36(5):1295-1305.  
GUAN Pinwu,TU Yazheng,ZHANG Pu, et al. A review on constitutive relationship of ultra-high-performance concrete under uniaxial compression and tension[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*,2019,36(5):1295-1305.
- [18] FENG Z,LI C X,HE J, et al. Static and fatigue test on lightweight UHPC-OSD composite bridge deck system subjected to hogging moment[J]. *Engineering Structures*,2021,241:112459.
- [19] 龙屹宇,陈双庆,唐春燕,等. 基于断裂力学的UHPC加固钢桥面板性能分析[J]. *中外公路*,2023,43(4):170-175.  
LONG Yiyu,CHEN Shuangqing,TANG Chunyan, et al. Performance analysis of steel bridge deck reinforced by UHPC based on fracture mechanics[J]. *Journal of China & Foreign Highway*,2023,43(4):170-175.
- [20] 聂建国,姜越鑫,聂鑫,等. 叠合板中桁架钢筋对预制板受力性能的影响[J]. *建筑结构学报*,2021,42(1):151-158.  
NIE Jianguo,JIANG Yuexin,NIE Xin, et al. Effect of truss reinforcement on mechanical properties of prefabricated slabs[J]. *Journal of Building Structures*,2021,42(1):151-158.