

文章编号:1671-1637(2026)05-0205-14

钢管增强混凝土拱面内受力全过程试验

何福云¹, 李聪^{*2}, 陈宝春^{1,2}, BRISEGHELLA Bruno^{1,3}

(1. 福州大学土木工程学院, 福建福州 350108; 2. 福建理工大学土木工程学院, 福建福州 350118;
3. 摩德纳雷焦艾米利亚大学 恩佐法拉利工程系, 摩德纳 41125)

摘要:为研究钢管增强混凝土(STRC)拱面内受力性能及各组成组合作用机理,开展了 STRC 及其外包钢筋混凝土(RC)与内置钢管混凝土(CFST)等拱模型受力全过程对比试验及精细化有限元分析,测试了各模型拱破坏模式、荷载-挠度(应变)曲线与裂缝发展,揭示了 STRC 拱受力全过程中内置 CFST 与外包 RC 间的组合作用机理。试验结果表明:在 1/4 跨径截面集中力作用下,STRC 拱分别在 1/4 跨径、3/4 跨径和两拱脚等截面处形成 4 个塑性铰,表现为反对称破坏;其受力全过程分为弹性、裂缝开展和破坏等 3 个主要阶段;STRC 拱受力全过程荷载-挠度曲线与 RC 拱基本一致,二者在达到极限承载力时对应的结构变形整体接近,而内置 CFST 仍处于弹塑性阶段,存在不同步受力状况;考虑不同步和同步时,STRC 拱的承载力实测值分别是其外包 RC 拱与内置 CFST 拱叠加值的 1.25 倍和 1.40 倍,存在一定的组合正效应。有限元分析结果表明:STRC 拱在外包混凝土开裂后,截面发生明显的应力重分布,外包 RC 与内置 CFST 间相互作用显著;内置 CFST 能有效抑制外包混凝土的裂缝开展,从而提高其裂后刚度和极限承载力。研究成果可为 STRC 拱承载力计算以及分析外包 RC 与内置 CFST 间的组合作用提供参考。

关键词:桥梁工程;钢管增强混凝土拱;破坏机理;组合作用;面内受力性能

中图分类号:U448.2 **文献标志码:**A **DOI:**10.19818/j.cnki.1671-1637.2026.040

Full-process test of in-plane load-bearing of steel tube reinforced concrete arch

HE Fu-yun¹, LI Cong^{*2}, CHEN Bao-chun^{1,2}, BRISEGHELLA Bruno^{1,3}

(1. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, Fujian, China; 2. School of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, Fujian, China; 3. Engineering Department of Enzo Ferrari, University of Modena and Reggio Emilia, Modena 41125, Modena, Italy)

Abstract: To investigate the in-plane mechanical behavior of steel tube reinforced concrete (STRC) arch and the composite interaction mechanism of all components, comparative full-range loading tests and refined finite element (FE) analysis were conducted on STRC arch, as well as the corresponding outer reinforced concrete (RC) and inner concrete-filled steel tube (CFST) arches. The failure modes, load-deflection (strain) curves, and crack development of all specimens were tested. The composite interaction mechanism between the outer RC and inner

出版历程:2025-05-23 收稿,2025-08-07 修回,2025-09-26 录用

基金项目:国家自然科学基金项目(52078136);中国博士后基金(2023T160138);福建理工大学科研启动基金(GY-Z23239);福建省教育厅中青年教育科研项目(科技类)重点项目(JZ240040)

作者简介:何福云(1998-),男,湖南衡阳人,工学博士研究生,E-mail:1304646273@qq.com。

***通信作者:**李聪(1990-),男,河南汝南人,教授,博士生导师,工学博士,博士后,E-mail:congli@fjut.edu.cn。

引用格式:何福云,李聪,陈宝春,等.钢管增强混凝土拱面内受力全过程试验[J].交通运输工程学报,2026,26(5):205-218.

Citation: HE Fu-yun, LI Cong, CHEN Bao-chun, et al. Full-process test of in-plane load-bearing of steel tube reinforced concrete arch [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2026, 26(5): 205-218.

CFST in STRC arches was elucidated. The experiment results show that under a concentrated load applied at the 1/4 span section, four plastic hinges formed at the 1/4 span, 3/4 span, and both arch springing sections, resulting in an anti-symmetric failure. The full-range loading process can be divided into three stages: elastic, cracking development, and failure. The load-deflection curve of the STRC arch is generally consistent with that of the RC arch, and both exhibit similar overall deformation at the ultimate load-bearing capacity. However, the inner CFST remains in the elastic-plastic stage, indicating asynchronous loading. Considering asynchronous and synchronous conditions, the measured load-bearing capacity of the STRC arch is approximately 1.25 and 1.40 times the sum of the capacities of the corresponding RC and CFST arches, respectively, demonstrating a positive composite effect. The FE results show that significant stress redistribution occurs in the section after cracking of the outer concrete, leading to pronounced interaction between the outer RC and inner CFST. The inner CFST effectively restrains crack development in the outer concrete, thereby enhancing both the post-cracking stiffness and ultimate load-bearing capacity. The findings provide a reference for the calculation of load-bearing capacity and the analysis of composite interaction between the outer RC and inner CFST in STRC arches.

Keywords: bridge engineering; steel tube reinforced concrete (STRC) arch; failure mechanism; composite action; in-plane mechanical behavior

Publication history: Received 2025-05-23; Received in revised form 2025-08-07; Accepted 2025-09-26

Funding: National Natural Science Foundation of China (52078136); China Postdoctoral Science Foundation (2023T160138); Start-up Fund of Fujian University of Technology (GY-Z23239); Key Project of the Education and Scientific Research of Education Department of Fujian Province for Young Teachers (JZ240040)

* **Corresponding author:** LI Cong, professor, PhD, E-mail: congli@fjut.edu.cn.

0 引 言

混凝土拱桥承载力高、刚度大、耐久性强、经济性好,是一种重要的桥型。中国已建和在建跨径不小于 100 m 的混凝土拱桥不少于 313 座^[1-3]。随着跨径增大,混凝土拱桥的施工难度不断增加。中国大跨径混凝土拱桥的发展处于世界前列,一个重要原因是采用了钢管混凝土(Concrete-filled Steel Tube, CFST)美兰法的施工技术^[4-5]。施工时,先架设重量轻、刚度大的空钢管拱,之后灌注管内混凝土形成 CFST 拱架,然后再外包混凝土,所建成的拱称为“CFST 美兰拱”或“CFST 劲性骨架混凝土拱”。中国众多大跨径混凝土拱桥均采用此法修建,其中最大跨径为 600 m(广西天峨龙滩大桥,2024 年建成)^[6-9]。

CFST 美兰拱(CFST 劲性骨架混凝土拱)成桥后的主拱截面由外包钢筋混凝土(Reinforced Concrete, RC)与内置 CFST 组成,成桥后的结构承

载力需要考虑施工过程中空钢管和 CFST 拱的初应力问题^[10-12]。若不考虑初应力问题,从结构自身受力的角度出发,可将钢管看成是增强混凝土的材料,称之为“钢管增强混凝土”(Steel Tube Reinforced Concrete, STRC)拱^[1]。

STRC 拱的应用源于施工的需要。因此,已有研究主要集中在施工方面,如管内混凝土灌注技术^[13-15]、外包混凝土浇筑方案^[16-19]、施工控制和稳定性分析^[20-21]等。对于 STRC 拱极限承载力的研究极少。目前仅收集到陈锦阳^[22]开展的“拱形钢管混凝土加劲混合结构”(Arched Concrete-encased CFST Structure, Arched CE-CFST Structure)的试验研究,结果表明:在极限承载力前,这种拱的力学性能类似于 RC 拱,但由于内置 CFST 的存在,其强度、刚度以及变形能力稍高于 RC 拱。

然而,陈锦阳^[22]所开展的模型拱试验采用多点对称加载,试验结果受初始缺陷的影响较大,呈现非对称的破坏形态,结果并不理想。同时,模型拱缩尺

较大,钢管直径仅 32 mm,管内砂浆灌注较难密实,也可能对试验结果带来不利影响。此外,该试验未进行外包 RC 拱和内置 CFST 拱的对比试验,无法揭示各组间的协同受力机理。

为此,本文聚焦 STRC 拱的受力特点,采用 $L/4$ (L 为计算跨径)截面单点非对称荷载工况,以降低试验结果对初始缺陷的敏感性;从理论研究而非生产性试验的角度出发,简化了截面形式,采用了较大的比例(钢管直径达 108 mm),同时开展了与 STRC 拱对应的外包 RC 拱和内置 CFST 拱的破坏性试验。通过试验,分析各模型拱的受力全过程、破坏模式、裂缝和应变发展规律,对比研究 STRC 拱与外包 RC 拱、内置 CFST 拱受力性能的异同。在此基础上,建立有限元模型,揭示外包 RC 和内置 CFST 在 STRC 拱中的组合作用机理。

1 试验概况

1.1 拱模型设计

He 等^[23-24]以广西天峨龙滩大桥拱肋截面为原型,保持面积比(内置 CFST 面积与总截面面积之比)不变,开展了 STRC 柱的受压性能研究。本文参考其截面形式,将模型拱横截面设计为 $440\text{ mm} \times 240\text{ mm}$,内置钢管外径为 108 mm、壁厚为 4.5 mm,对应的面积比为 0.09,与广西天峨龙滩大桥 $L/4$ 拱肋截面的面积比一致;纵筋为 8 根直径 12 mm 的螺纹钢,对应的纵筋率为 0.9%,与实桥中保持一致;箍筋直径为 8 mm,由于截面较大,采用了双箍筋的形式,间距为 80 mm,如图 1(a)所示。考虑到实验室加载条件,纵桥向参考陈宝春等^[25]所设计的模型拱,计算跨径 $L=7.5\text{ m}$,计算矢高 $f=1.5\text{ m}$,矢跨比为 1/5,拱轴线为二次抛物线,模型拱纵断面如图 1(b)所示。

为探究 STRC 拱与 RC 拱、CFST 拱受力性能上的异同与组合作用机理,还同批设计了 1 根 RC 拱和 1 根 CFST 拱。其中,RC 拱与 STRC 拱中的外包 RC 组分对应,采用空心横截面,除未内置 CFST 以外,其他构造参数均与 STRC 拱一致,截面长宽同为 $440\text{ mm} \times 240\text{ mm}$,中空直径为 108 mm。CFST 拱与 STRC 拱中的内置 CFST 组分对应,各项参数均与其保持一致,钢管外径为 108 mm,壁厚为 4.5 mm,各模型拱参数信息见表 1。

模型拱管内采用 C140 超高强混凝土,外包采用 C50 混凝土。按照《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019),测得管内与外包混

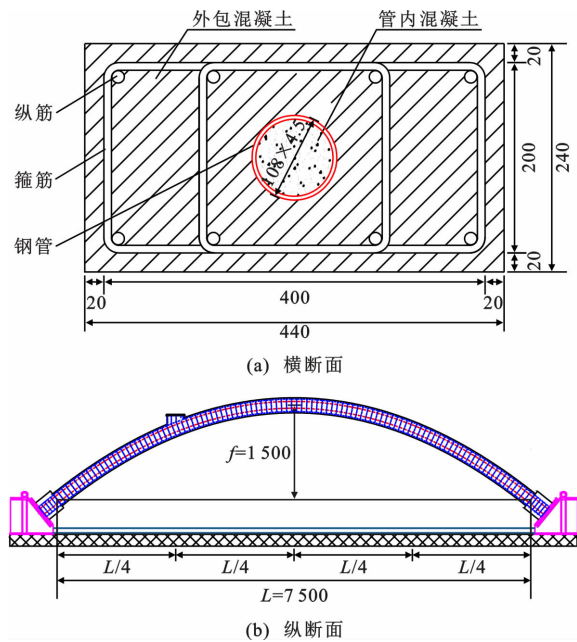


图 1 模型拱截面信息(单位:mm)

Fig. 1 Section information of model arch (unit: mm)

表 1 模型拱参数信息

Table 1 Parameters information of model arch

| 类型 | 计算跨径/m | 计算矢高/m | 横截面 |
|--------|--------|--------|-----|
| STRC 拱 | 7.5 | 1.5 | |
| RC 拱 | 7.5 | 1.5 | |
| CFST 拱 | 7.5 | 1.5 | |

凝土立方体抗压强度分别为 141.0、56.9 MPa,棱柱体抗压强度分别为 126.0、34.2 MPa,如表 2 所示。其中, f_{cu} 、 f_c 、 E_c 、 ϵ_c 分别为混凝土的立方体抗压强度、棱柱体抗压强度、弹性模量与极限压应变。钢管采用 Q420 高强度无缝钢,按照《金属材料 拉伸试验 第 1 部分:室温试验方法》(GB/T 228.1—2021)测得外径 108 mm 钢管的屈服强度为 461.6 MPa。纵筋和箍筋采用 HRB400 螺纹钢,屈服强度分别为 443.2、465.3 MPa,如表 3 所示。其中, f_y 、 f_u 、 E_s 、 ϵ_y 分别为钢材的屈服强度、极限强度、弹性模量与屈服应变。

1.2 加载方案

图 2 为模型拱加载装置。所有模型拱均为 $L/4$ 截面单点集中力加载。为方便加载,在 $L/4$ 截面处预埋钢构件连接加载面板与内置钢筋笼,之后浇筑混凝土形成加载支座。试验加载装置由反力架、滑动支座、千斤顶和压力传感器 4 个部分组成,千斤顶

表2 混凝土材料性能

Table 2 Material properties of concrete

| 强度等级 | f_{cu}/MPa | f_c/MPa | E_c/GPa | $\epsilon_c/10^{-3}$ |
|------|---------------------|------------------|------------------|----------------------|
| C50 | 56.9 | 34.2 | 32.8 | 2.255 |
| C140 | 141.0 | 126.0 | 47.8 | |

表3 钢管与钢筋材料性能

Table 3 Material properties of steel tubes and rebars

| 类型 | 规格/mm | f_y/MPa | f_u/MPa | E_s/GPa | $\epsilon_y/10^{-3}$ |
|----|---------|------------------|------------------|------------------|----------------------|
| 钢管 | 108×4.5 | 461.6 | 671 | 198 | 2.675 |
| 钢筋 | 8 | 443.2 | 639 | 206 | 2.262 |
| | 12 | 465.3 | 626 | 197 | 2.480 |

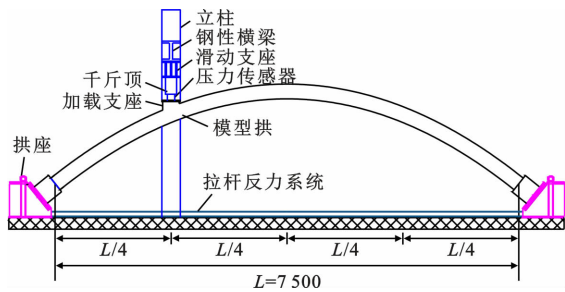


图2 加载装置(单位:mm)

Fig. 2 Test set-up (unit: mm)

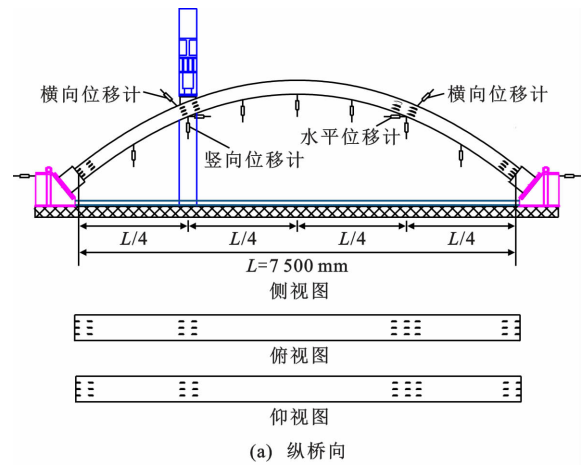
固定在滑动支座上,允许其加载过程能够沿纵桥向滑动,确保千斤顶始终对模型拱施加竖向集中力。另外,在两拱脚处浇高形成加固段,并在两拱座间设置槽钢拉杆,拉杆与拱座形成自平衡系统,用以抵抗拱脚水平推力。试验加载前,将自平衡系统与地基锚固,确保无铰拱拱脚固结的边界条件。

采用分级力控的加载方式,在荷载达到预估极限承载力的70%之前,每次所加载荷为20 kN,持载2 min;之后,将每次所加载荷降为10 kN,持载时间增至3 min。每次持荷过程中,观察和记录裂缝发展情况。当接近极限承载力时,由于拱的挠度增加的速度较快,无法继续使用分级加载,减慢加载速率直到荷载无法保持稳定时,停止加载。

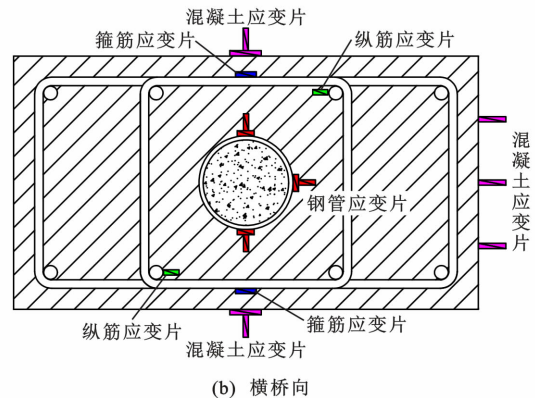
试验加载过程中,采用位移计对各模型拱面外以及拱座的位移进行了测量。结果显示:各模型拱中L/4和3L/4截面的最大面外位移分别为5.32、2.70 mm,分别仅为计算跨径的1/1410和1/2778。因此,可认为该试验为理想的面内受压。各模型拱中X=0和X=L两拱脚截面沿纵桥向的最大位移分别为0.20、1.54 mm,分别仅为计算跨径的1/37500和1/4870,根据现行《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)的规定:当位移小于L/1000时,可认为其对主拱结构的内力分布与变形特征受该位移影响较小,近似视为固接边界。

1.3 测试方法

在4个关键截面位置的钢管、纵筋、箍筋和混凝土上分别采用粘贴应变片测得其应变,应变片详细布置位置见图3。在模型拱L/8、L/4、3L/8、L/2以及另外半跨对称截面位置粘贴树脂板,布置对应位移计测量各截面位置的挠度。通过油泵控制器进行荷载控制加载,加载过程中通过力传感器获取荷载。



(a) 纵桥向



(b) 横桥向

图3 测点布置

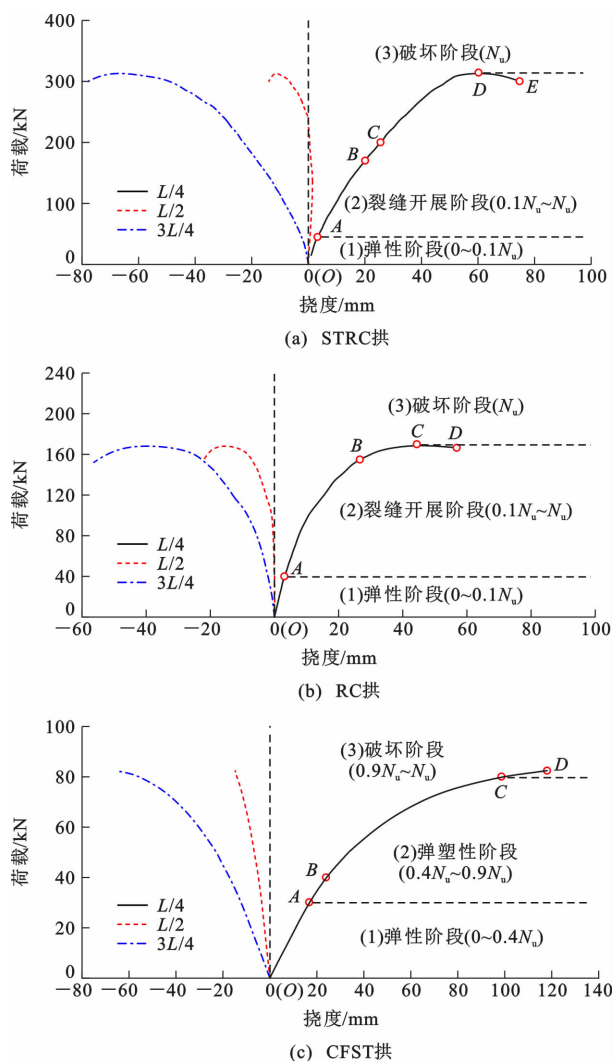
Fig. 3 Layouts of measuring points

2 试验结果与分析

2.1 受力全过程

图4为模型拱关键截面处的荷载-挠度曲线。其中,STRC拱与RC拱的受力全过程基本一致。因此,以STRC拱的荷载-L/4截面挠度曲线为例分析其受力全过程。结合实测的挠度曲线和观察到的试验现象,定义了5个特征点(A~E)。根据这5个特征点,可将模型拱的整个受力全过程划分为3个主要阶段,分别是弹性阶段(OA阶段:0~0.1 N_u)、裂缝开展阶段(AD阶段:0.1 N_u ~ N_u)和破坏阶段(DE阶段: N_u)。下面对各阶段模型拱的受力性能分别进行描述。

(1)弹性阶段(OA阶段:0~0.1 N_u):模型拱在

图 4 各模型拱荷载- $L/4$ 截面挠度曲线Fig. 4 Load-deformation curves at the $L/4$ section of various model arches

弹性阶段时,荷载随各截面挠度呈线性增加,外包混凝土表面完好,未见明显可见裂缝。

(2) 裂缝开展阶段 (AD 阶段: $0.1N_u \sim N_u$): 当荷载达到 $0.1N_u$ (A 点) 时, $L/4$ 加载点的下缘出现横向贯穿裂缝。随着荷载继续增大, 裂缝逐渐加宽、数量增多并沿拱肋高度方向延伸至侧面。当荷载接近 $0.2N_u$ 时, 截面裂缝延伸至拱肋 $1/2$ 高度以上。此时, $L/4$ 截面已形成塑性铰, 内力发生重分布。当荷载达到 $0.2N_u$ 时, $3L/4$ 截面上缘开裂。随着荷载增加, 裂缝纵向往拱脚和拱顶截面发展, 竖向沿着拱肋高度向下缘延伸, 当荷载接近 $0.4N_u$ 时, 各裂缝延伸至拱肋 $1/2$ 高度附近。此时, $3L/4$ 截面已形成塑性铰。当荷载达到 $0.4N_u$ 时, $X=0$ (左拱脚) 截面上缘混凝土开裂。随后裂缝数量增多, 并沿着拱肋高度延伸至侧面 $1/2$ 高度附近。由于已形成 2 个塑性铰 ($L/4$ 和 $3L/4$ 截面), 此阶段的荷载随着各

截面挠度呈非线性增加。当荷载达到 $0.5N_u$ 时, $L/4$ 截面纵筋 (B 点) 和钢管 (C 点) 相继受拉屈服, 达到 $0.9N_u$ 时, $X=L$ (右拱脚) 截面下缘开裂。

(3) 破坏阶段 (DE 阶段: N_u): 当荷载接近极限承载力 N_u 时 (D 点), 各关键截面处的裂缝宽度急剧增大, $L/4$ 截面上缘和 $3L/4$ 截面下缘混凝土压溃并剥落, 荷载无法维持稳定, 变形不断增大, 模型拱丧失承载力。

对于 CFST 拱, 为分析其受力全过程, 同样定义了 4 个特征点 ($A-B-C-D$), 如图 4(c)。其中, A 点为弹性极限荷载; B 点为 $L/4$ 截面钢管屈服时的荷载与挠度; C 点为 CFST 拱无法继续承载时的荷载与挠度; D 点为加载终点。根据定义的 4 个特征点, 可将 CFST 拱的受力全过程分为弹性阶段 (OA : $0 \sim 0.4N_u$)、弹塑性阶段 (AC : $0.4N_u \sim 0.9N_u$) 和破坏阶段 (CD : $0.9N_u \sim N_u$)。在弹性阶段 (OA) 段, 荷载随各截面挠度基本呈线性增大, 弹性极限荷载约为 $0.4N_u$ 。进入弹塑性阶段 (AC 阶段) 后, 当达到 $0.5N_u$ 时 (B 点), $L/4$ 截面附近的钢管屈服, 内力发生重分布, 结构刚度降低, 荷载随各截面挠度呈非线性增大。当荷载达到 $0.9N_u$ 时, $L/4$ 截面挠度急剧增大, 结构丧失承载力而破坏。

图 5 为各模型拱的变形曲线, 可以看出: 对于 STRC 拱与 RC 拱, 在 $X=0$ (左拱脚) 截面开裂前 ($N < 0.6N_u$, N 为荷载), 即第 3 个塑性铰形成之前, 模型拱仍为超静定结构, 各截面的挠度较小, 且随荷载缓慢增大。当 $X=L$ 截面开裂 ($N > 0.9N_u$) 后, 即第 4 个塑性铰形成后, 模型拱由超静定体系转变为机构体系, 各截面挠度急剧增大, 结构丧失承载力并破坏。对于 CFST 拱, 其挠度-截面位置变化曲线与 STRC 拱与 RC 拱相似, 但挠度值更大。

2.2 破坏模式

图 6 为 STRC 拱、RC 拱与 CFST 拱加载结束照片, 可以看出: 各模型拱在 $L/4$ 截面单点集中荷载作用下, 整体均表现为反对称破坏。对于 STRC 拱与 RC 拱, 模型拱的破坏主要集中在 4 个关键截面处, 分别是 $X=0$ 截面 (左拱脚)、 $X=L/4$ 截面、 $X=3L/4$ 截面上缘和 $X=L$ (右拱脚)。其中, $L/4$ 截面下缘混凝土被拉裂, 上缘混凝土压溃, 截面破坏最为严重且最早破坏。其次是 $3L/4$ 截面, 其上缘混凝土被拉裂, 下缘混凝土也有少量压溃现象, $X=0$ 截面和 $X=L$ 截面的混凝土分别在上缘和下缘受拉开裂, 如图 7 所示。

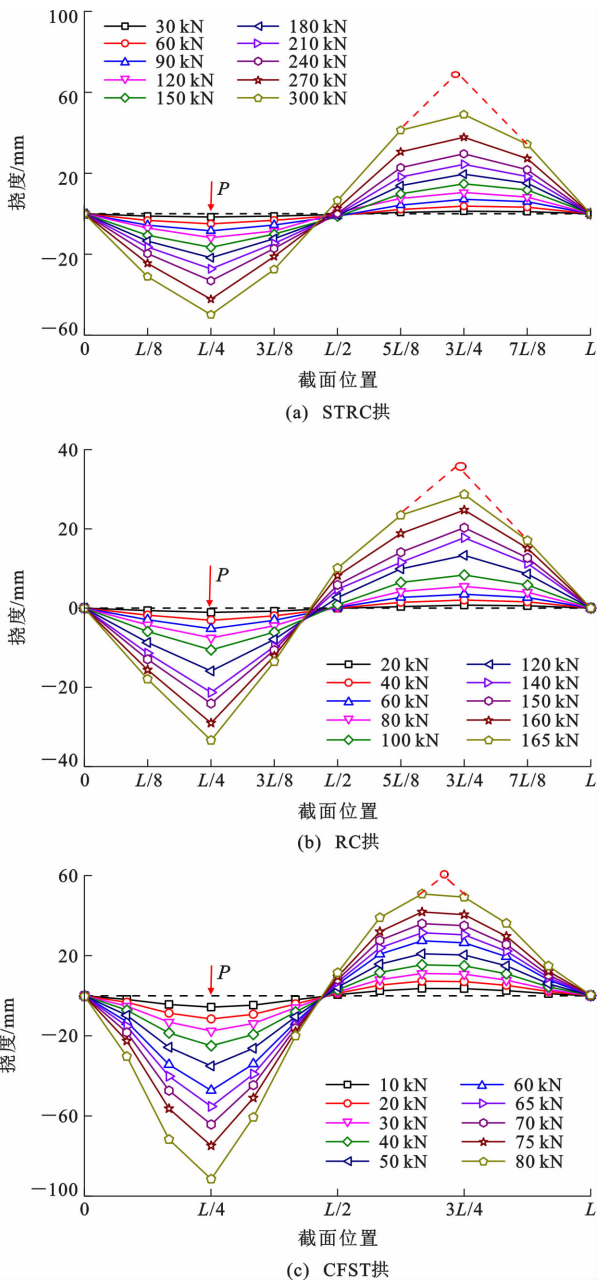


图5 各模型拱的截面挠度

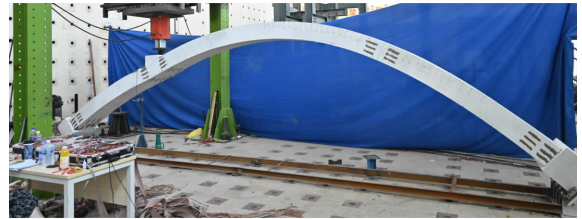
Fig. 5 Sectional deformations of each model arch

2.3 应变分析

图8为STRC拱各截面的荷载-应变曲线,可以看出: $X=0$ (左拱脚)截面下缘、 $L/4$ 截面上缘、 $3L/4$ 截面下缘和 $X=L$ (右拱脚)截面上缘的应变均为负值,表明这些位置的混凝土、钢管和纵筋在受力全过程中均处于受压状态。与之相对应的 $X=0$ (左拱脚)截面上缘、 $L/4$ 截面下缘、 $3L/4$ 截面上缘和 $X=L$ (右拱脚)截面下缘的应变为正值,表明这些位置的混凝土、钢管和纵筋在受力全过程中受拉。此外,各截面中, $L/4$ 截面上缘的混凝土、钢管和纵筋的应变最大,其次是 $X=0$ 截面与 $X=3L/4$ 截面下缘,



(a) STRC模型拱



(b) RC模型拱



(c) CFST模型拱

图6 各模型拱整体破坏模式

Fig. 6 Global failure modes of various model arch

$X=L$ 截面上缘最小。

对于各截面受压侧混凝土,当荷载达到 $0.6N_u$ 时, $L/4$ 截面上缘的混凝土应变达到材性试验测到的峰值压应变(2.1×10^{-3});当接近极限承载力 N_u 时, $X=0$ 截面下缘、 $X=3L/4$ 截面下缘、 $X=L$ 截面上缘均达到混凝土极限压应变。各截面受拉侧混凝土中, $L/4$ 截面下缘混凝土应变在 $0.1N_u$ 时快速增大,并超过混凝土极限拉应变;接着, $X=0$ 截面上缘、 $X=3L/4$ 截面上缘混凝土应变分别在 $0.3N_u \sim 0.5N_u$ 迅速增大并超过极限拉应变;最后, $X=L$ 截面下缘混凝土应变在接近极限承载力 N_u 时迅速增大并超过极限拉应变。这与第2.1节中受力全过程中裂缝开展过程一致。

对于钢管和纵筋应变,各截面受压侧钢管和纵筋的应变均较小,在整个受力全过程中均小于材性试验中测得的钢管的屈服强度,这说明受压侧钢管和纵筋均未发生屈服。各截面的受拉侧钢管和纵筋中, $L/4$ 截面下缘的钢管和纵筋应变在 $0.1N_u$ 时急剧增大,接着是 $X=0$ (左拱脚)截面上缘和 $3L/4$ 截面上缘的钢管和纵筋应变在 $0.3N_u \sim 0.6N_u$ 快速发展,最后, $X=L$ (右拱脚)截面下缘钢管和纵筋在接近 N_u 急剧增大,这与受拉侧混凝土应变的发展规

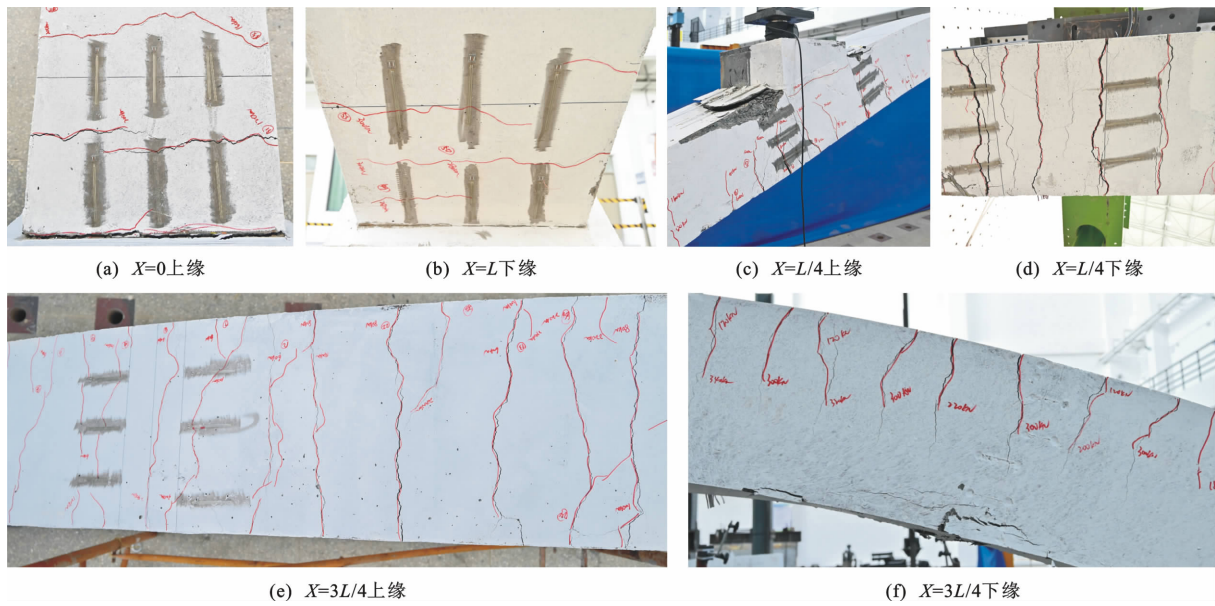


图 7 STRC 拱各关键截面处的裂缝照片

Fig. 7 Crack photos at critical sections of STRC arch

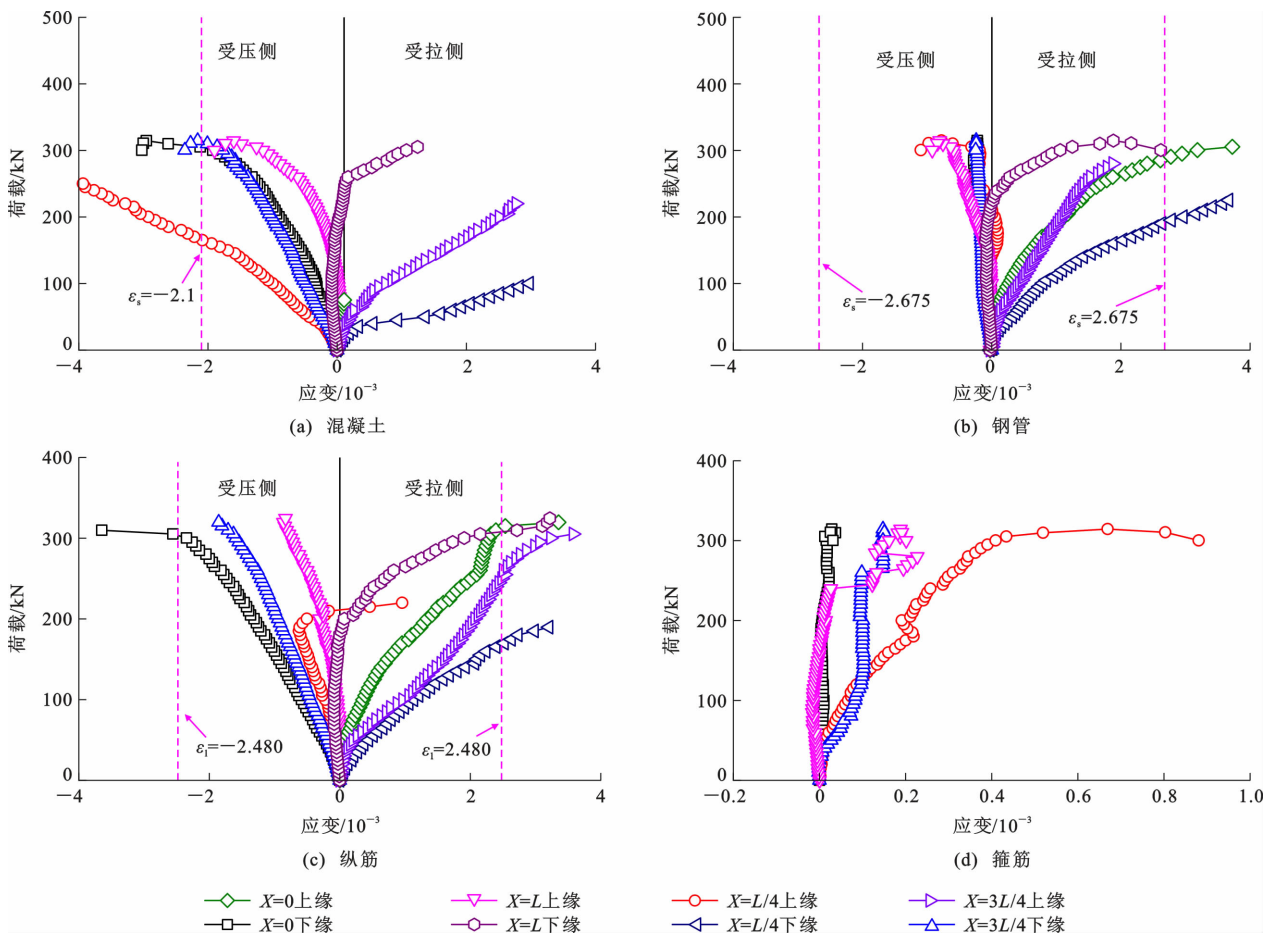


图 8 STRC 拱各截面荷载-应变曲线

Fig. 8 Load-strain curves at various sections of STRC arch

律以及观察到的混凝土开裂现象基本一致。此外，各截面受拉侧的钢管、纵筋在拱达到极限承载力时均已屈服，如图 8(b)、(c)所示。

图 8(d)为 STRC 拱各截面荷载-箍筋应变曲线，可以看出： $L/4$ 截面处的箍筋应变在接近极限承载力 N_u 时急剧增大，且受拉屈服，这主要是因为

$L/4$ 截面在达到极限承载力时,外部保护层混凝土压溃,丧失承载力,轴力向内部箍筋约束混凝土转移,导致箍筋应变急剧增大。相对来说,其他截面处的箍筋应变在受力全过程中均较小,应变均未超过 2.0×10^{-4} 。

2.4 裂缝分析

2.4.1 裂缝开展过程

STRC 拱的裂缝开展过程与 RC 拱基本一致。因此,以 STRC 拱为例介绍其裂缝开展过程。图 9 为 STRC 拱受力全过程中几个关键时刻的裂缝分布情况,可以看出:裂缝发展过程大致可分为 4 个阶段,对应 4 个塑性铰的形成,分别为 $L/4$ 截面下缘和侧面裂缝开展(第 1 阶段)、 $3L/4$ 截面上缘和侧面裂缝开展(第 2 阶段)、 $X=0$ (左拱脚)截面上缘和侧面裂缝开展(第 3 阶段)、 $X=L$ (右拱脚)截面下缘和侧面裂缝开展(第 4 阶段)。

在弹性阶段($0 \sim 40$ kN),模型拱外包混凝土表面整体完好,除制作过程中产生的几处收缩裂缝外,未见明显新增裂缝。当荷载达到 40 kN 时,在 $L/4$ 截面下缘产生第 1 条初始裂缝,裂缝宽度为 0.08 mm。随着荷载增大, $L/4$ 截面下缘混凝土陆续产生多条裂缝并延伸至拱肋侧面 $1/2$ 高度附近。当荷载达到 80 kN 时, $L/4$ 截面下缘和侧面裂缝的开展(第 1 阶段)已基本结束,在该截面处已形成第 1 个塑性铰。

由于 $L/4$ 截面塑性铰的形成,内力发生重分布,裂缝开展位置由 $L/4$ 截面移动到 $3L/4$ 截面。当荷载达到 80 kN 时, $3L/4$ 截面上缘混凝土开裂。随着荷载增大,裂缝逐渐延伸至侧面 $1/2$ 高度位置,开裂位置也由 $3L/4$ 截面逐渐向拱顶($L/2$)和右拱脚($X=L$)截面移动。当荷载达到 160 kN 时, $3L/4$ 截面的裂缝开展位置已移动到拱顶截面,第 2 阶段裂缝开展也已基本结束。值得注意的是,在这一阶段, $L/4$ 截面仍有少量裂缝产生并伴随着裂缝宽度的增加,但非主要的裂缝开展位置。

当荷载达到 160 kN 时, $X=0$ (左拱脚)截面上缘混凝土开裂。随着荷载增大,裂缝数量增多并延伸至侧面 $1/2$ 高度,开裂位置由近拱脚截面向 $L/4$ 截面移动。当荷载达到 240 kN 时,该截面裂缝开展(第 3 阶段)基本结束。这一阶段中, $L/4$ 截面仅在各裂缝间产生细微短裂缝,但未融合贯通,裂缝宽度增大明显。 $3L/4$ 截面裂缝仍有新裂缝产生,且各裂缝间也出现较多细微短裂缝,但未融合贯通。

当荷载接近极限承载力(315 kN)时, $X=L$ (右

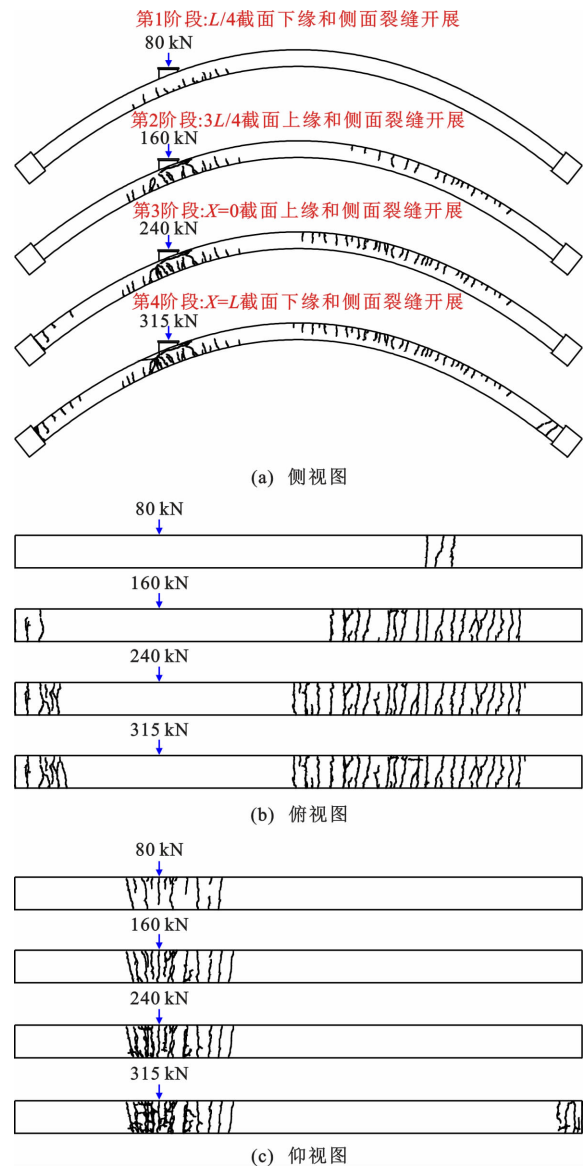


图 9 STRC 模型拱裂缝发展与分布

Fig. 9 Crack development and distribution in STRC arch

拱脚)截面下缘混凝土开裂。随着荷载增大,裂缝数量增加并延伸至侧面 $1/2$ 高度。当达到极限承载力时,该截面的裂缝开展(第 4 阶段)也已基本结束。在这一阶段,各截面裂缝相互融合贯通,4 个塑性铰已全部形成,模型拱已无法继续承载,试验结束。模型拱加载结束后 4 个关键截面位置的裂缝分布照片如图 7 所示。

2.4.2 裂缝分布与最大宽度

在裂缝分布方面,STRC 拱在 4 个关键截面的裂缝分布长度分别为 0.80、1.78、3.32、0.30 m,相比 RC 拱在 4 个关键截面处的裂缝分布范围(0.46、1.00、1.87、0.48 m)更广,如图 10 所示。此外,STRC 拱的最大裂缝宽度小于同一荷载下 RC 拱的裂缝宽度,但数量更多。例如,在 100 kN 时,STRC

拱的最大裂缝宽度为 0.24 mm,远小于 RC 拱的 1.40 mm,如图 11 所示。由此表明,内置 CFST 对限制外包混凝土裂缝开展有显著作用。

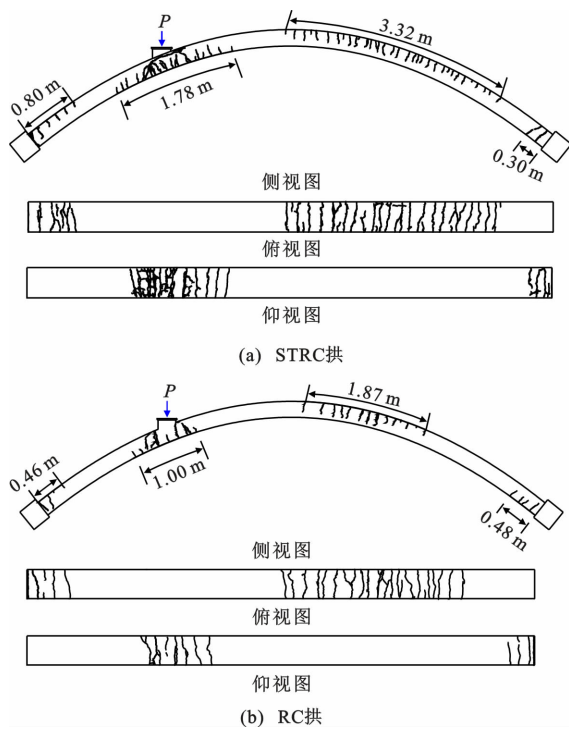


图 10 STRC 拱与 RC 拱裂缝分布对比

Fig. 10 Comparison of crack distributions between STRC arch and RC arch

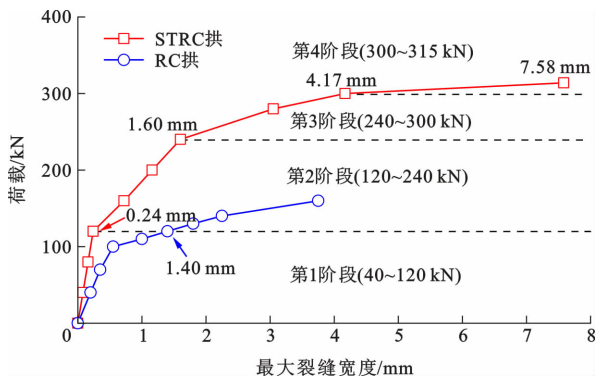


图 11 荷载-最大裂缝宽度曲线

Fig. 11 Load-maximum crack width curves

图 11 为 STRC 模型拱最大裂缝宽度随荷载的变化曲线。与裂缝发展阶段基本对应,最大裂缝宽度随荷载的变化过程也可分为 4 个阶段。当荷载为 40 kN 时,出现第 1 条初始裂缝,裂缝宽度为 0.08 mm,随着荷载增大,最大裂缝宽度线性缓慢增大,在 $L/4$ 截面裂缝开展(第 1 阶段)结束时,最大裂缝的宽度仅 0.24 mm。第 1 个塑性铰形成以后(120 kN),最大裂缝宽度发展进入第 2 阶段,增长速率较第 1 阶段增大,在 $3L/4$ 截面裂缝(第 2 个塑性铰)开展基本结束时,最大裂缝宽度增大至

1.6 mm。随着 $X=0$ (左拱脚,第 3 塑性铰)截面开裂,最大裂缝宽度增长速率继续增大,第 3 阶段结束时,最大裂缝宽度为 4.17 mm。当荷载达到 300 kN 左右时, $X=L$ (右拱脚)截面开裂,形成第 4 个塑性铰。这一阶段,最大裂缝宽度急剧增大,当达到极限承载力时,最大裂缝宽度增大至 7.58 mm,模型拱已基本丧失承载力。需要说明的是,STRC 拱的最大裂缝均出现在 $L/4$ 截面下缘,且为加载中出现的第 1 条裂缝。

3 组合作用讨论与分析

3.1 组合作用讨论

图 12 为 STRC 拱、RC 拱和 CFST 拱的荷载- $L/4$ 截面挠度曲线对比,可以看出:STRC 拱与 RC 拱的荷载- $L/4$ 挠度曲线在弹性阶段重合,这表明 STRC 拱在弹性阶段的受力性能与 RC 拱基本相同。当荷载达到 100 kN (RC 拱极限承载力的 58.8%)时,RC 拱在 $L/4$ 和 $3L/4$ 截面开裂并形成塑性铰,受力进入弹塑性阶段,挠度发展加快,面内受压刚度逐渐小于 STRC 拱。当 RC 拱达到其极限承载力(170 kN)时,STRC 拱的荷载为 285 kN,为其极限承载力的 90.5%。当 STRC 拱达到其极限承载力(315 kN)时,RC 拱的承载力降低至 155 kN,为其自身极限承载力的 91.1%。因此,可认为 STRC 拱与 RC 拱基本上同时达到其极限承载力。

STRC 拱的极限承载力为 315 kN,相比 RC 拱(极限承载力为 170 kN),增加了 145 kN,增幅达 85.8%。这表明:由于内置 CFST 的存在,STRC 拱开裂后的刚度大于 RC 拱,且极限承载力更高,内置 CFST 提高了 STRC 拱开裂后的受力性能与极限承载力。

对比 STRC 拱与 CFST 拱的荷载-挠度曲线发现,STRC 拱的面内刚度在受力全过程中远大于 CFST 拱,且在 STRC 拱达到极限承载力(315 kN)时,CFST 拱的承载力为 70 kN,为其自身极限承载力(82 kN)的 84.9%,为 STRC 拱极限承载力的 22.2%。由此表明:STRC 拱达到极限承载力时,内置 CFST 的承载力未能完全发挥,且对 STRC 拱的承载力贡献较小,STRC 拱与 CFST 拱的受力性能差异较大。

综上所述,STRC 拱的面内受压刚度与极限承载力远大于 CFST 拱,荷载-挠度曲线的整体趋势也相差较大。相反,由于内置 CFST 的存在,尽管 STRC 拱裂缝开展后的刚度以及极限承载力大于 RC 拱,但二者极限承载力所对应的挠度几乎一致,

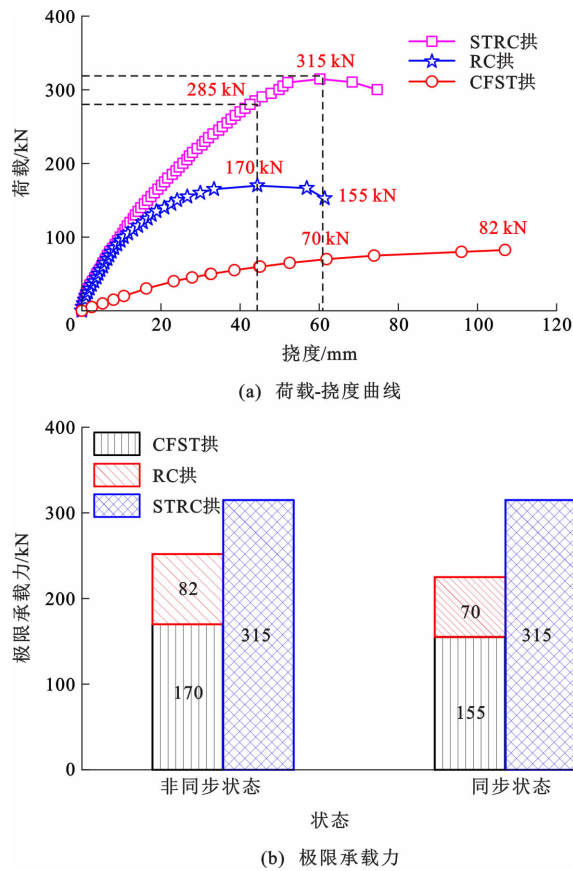


图 12 组合作用分析

Fig. 12 Analysis of composite action

荷载-挠度曲线在弹性阶段重合且整体趋势接近。因此,STRC拱的受力性能与RC拱更为接近。

此外,由图12(a)可见:STRC拱、外包RC拱和内置CFST拱并非同时达到其各自的极限承载力,即外包RC与内置CFST间的极限承载力存在组合效应。因此,分别对其同步(即STRC拱达到极限承载力时对应的外包RC与内置CFST的承载力)与非同步状态(仅考虑各拱的极限承载力)下的组合效应进行讨论。

图12(b)为STRC拱中CFST与RC的组合作用。考虑同步状态时,即当CFST模型拱达到极限承载力时,RC拱与CFST拱的承载力分别为155 kN和70 kN,二者叠合后的承载力为225 kN,小于STRC拱的极限承载力(315 kN),二者的比值为1.4。非同步状态时,模型拱RC(外包RC)与CFST拱(内置CFST)的极限承载力分别为170 kN和82 kN,二者叠加后的极限承载力为252 kN,也小于STRC拱的极限承载力(315 kN),二者的比值为1.25。

由此可见,无论同步或非同步极限状态,外包RC拱与内置CFST拱承载力的叠加值均小于STRC拱,

即STRC拱中内置CFST与外包RC间存在组合效应。其原因可能在于,内置CFST受到外包RC约束处于三向受压状态,获得更高的承载力,而内置CFST的存在,又进一步延缓了外包RC的开裂。

由韦建刚等^[5]的分析可知,钢-混凝土组合结构的受力性能介于钢结构与混凝土结构之间,但可定性地归为偏向钢结构、偏向混凝土结构和处于二者之间的三大类。He等^[23-24]开展的研究表明,对于同由外包RC和内置CFST组成的柱子来说,面积比较小的柱子,其受力性能更接近RC柱,可称其为STRC柱;而对于CFST面积较大的柱子,其受力性能更接近CFST,可称其为混凝土外包CFST(Concrete Encased-CFST, CE-CFST)柱。本文的试验表明,STRC拱为组合结构,从第2.1和2.4节中的受力全过程、结构变形与开裂等性能来看,它更偏向于钢筋混凝土拱而不是CFST拱,陈锦阳^[22]开展的模型拱试验结果也表明了这一点。因此,将其命名为STRC拱较之CE-CFST拱更合理。

3.2 有限元模型

为更好揭示STRC拱中外包RC和内置CFST受力承载机理,采用ABAQUS软件分别建立3种模型拱的有限元模型。因STRC拱截面由外包RC和内置CFST组成,其包含了RC拱和CFST拱,故以STRC拱为例进行介绍,如图13所示, d_i 和 r_i 分别为平动和转动自由度, i 为 x 、 y 、 z 方向。STRC拱中包含钢管、管内混凝土、外包混凝土、纵向钢筋、箍筋和端板6个部件。其中,钢管、管内混凝土、外包混凝土和端板均采用三维八节点减缩积分(C3D8R)实体单元模拟,纵向钢筋和箍筋采用三维两节点(T3D2)桁架单元模拟^[26-27]。综合考虑计算精度、收敛性与计算效率,经过不断试算后确定有限元模型的网格尺寸为30 mm。

管内混凝土和外包混凝土分别采用《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)和韩林海等^[28]建议

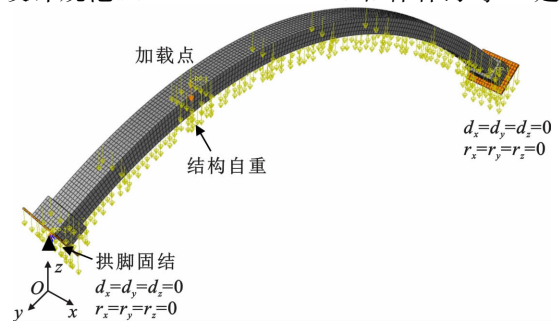


图 13 STRC拱的有限元模型

Fig. 13 Finite element model of STRC arch

的考虑钢管约束的管内混凝土本构关系模型。钢管和纵筋采用考虑应变硬化的二折线的弹塑性本构关系^[29]。

有限元模型中不考虑钢筋与混凝土之间的相互滑移,将纵向钢筋与箍筋形成的钢筋笼采用 ABAQUS 中的“Embedded”约束嵌入到外包混凝土中,钢筋节点平动与转动自由度与外包混凝土相关联^[30]。此外,模型建立过程中考虑了钢管与管内以及外包混凝土之间的相互接触作用,钢管与管内及外包混凝土之间在法向上采用“Hard”接触模拟其界面性能,该接触允许混凝土与钢管在界面上相互分离,此时的接触应力为 0,但钢管与混凝土接触后无法相互穿透。在切线方向上,采用库仑摩擦模型,钢管壁与混凝土之间摩擦因数取为 0.6^[31]。

在两拱脚处建立参考点(Reference Point, RP),并将参考点与拱脚截面间定义耦合关系,该关系将拱脚截面的位移和转角与参考点关联,通过约束参考点所有方向转动(r_x 、 r_y 、 r_z)和平动自由度(d_x 、 d_y 、 d_z)的方式,实现无铰拱拱脚固结的边界条件,如图 13 所示。另外,为模拟集中力加载,在加载点上方设置参考点,并将参考点与加载面耦合,通过在参考点上施加集中力的方式来模拟加载。此外,

模型建立过程中,设置了各项材料的密度参数,并对整个模型施加了自重荷载,充分考虑了结构自重的影响。

对于 RC 拱和 CFST 拱,分别将 STRC 拱有限元模型中的 CFST 部分和外包 RC 部分删除即可,其他均与对应的 STRC 拱一致,这里不再赘述。

图 14 为各模型拱有限元与试验结果对比。从图 14(a)~(c)可知:各模型拱试验测得的荷载-挠度曲线与有限元模拟结果总体吻合较好。图 14(d)给出了有限元模拟的模型拱的极限承载力与试验实测值的对比结果,可见:有限元模拟的各模型拱的极限承载力与试验实测值间的误差小于 10%,有限元模拟值与试验值比值(N_{uf}/N_{ue})的平均值为 0.999,标准差为 0.013,拟合效果较好。

图 15 为试验观察到的裂缝分布与有限元的模拟结果对比。从图 15(a)可知,有限元模拟的裂缝整体分布与试验观察到的裂缝分布基本一致,均表现为 $X=0$ 截面上缘、 $X=L/4$ 截面下缘、 $X=3L/4$ 截面和 $X=L$ 截面下缘 4 个关键部位处的混凝土被拉裂。同时, $L/4$ 截面上缘混凝土被压溃,如图 15(b)所示。

综上所述,本文有限元的计算结果与试验结果

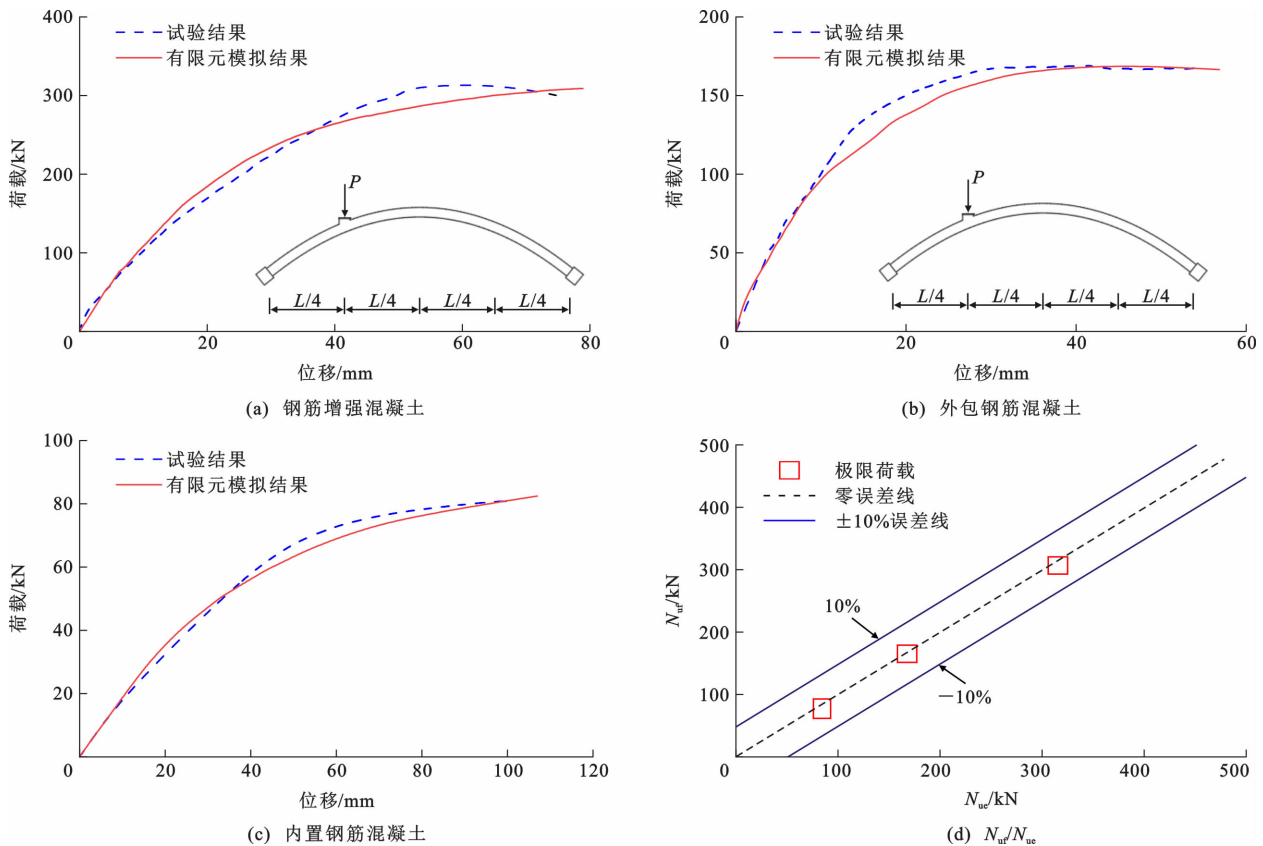


图 14 试验与有限元结果对比

Fig. 14 Comparison between experimental and finite element results

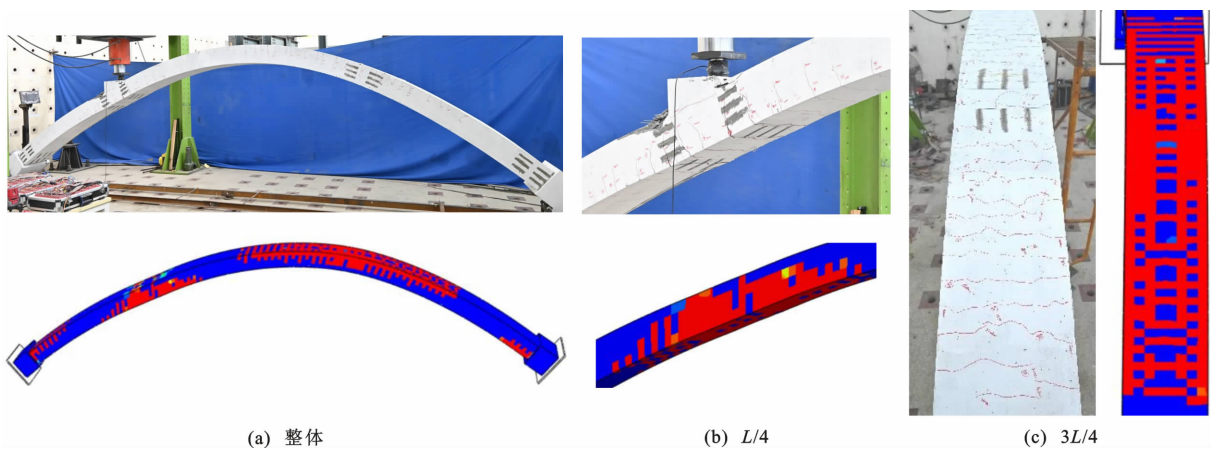


图 15 试验观察与有限元模拟的变形以及裂缝分布对比

Fig. 15 Comparison of deformations and crack distributions between experimental and finite element simulations

总体上吻合较好,可较好地模拟 STRC 拱的面内受力性能。

3.3 组合作用分析

STRC 拱中外包 RC 与内置 CFST 间的接触应力可用于分析二者间的相互作用。图 16 为 STRC 拱 4 个关键截面位置处内置 CFST 组分与外包 RC

组分间的接触应力,可以看出:各关键截面位置处,二者间的接触应力在弹性阶段(OA 阶段)呈线性增大。进入开裂阶段后,钢管与外包混凝土间的接触应力继续增大。由此表明,钢管的侧向变形在受力全过程中均受外包混凝土的约束作用。其中,加载处 $X=L/4$ 截面位置处的接触应力最大,且靠近上缘

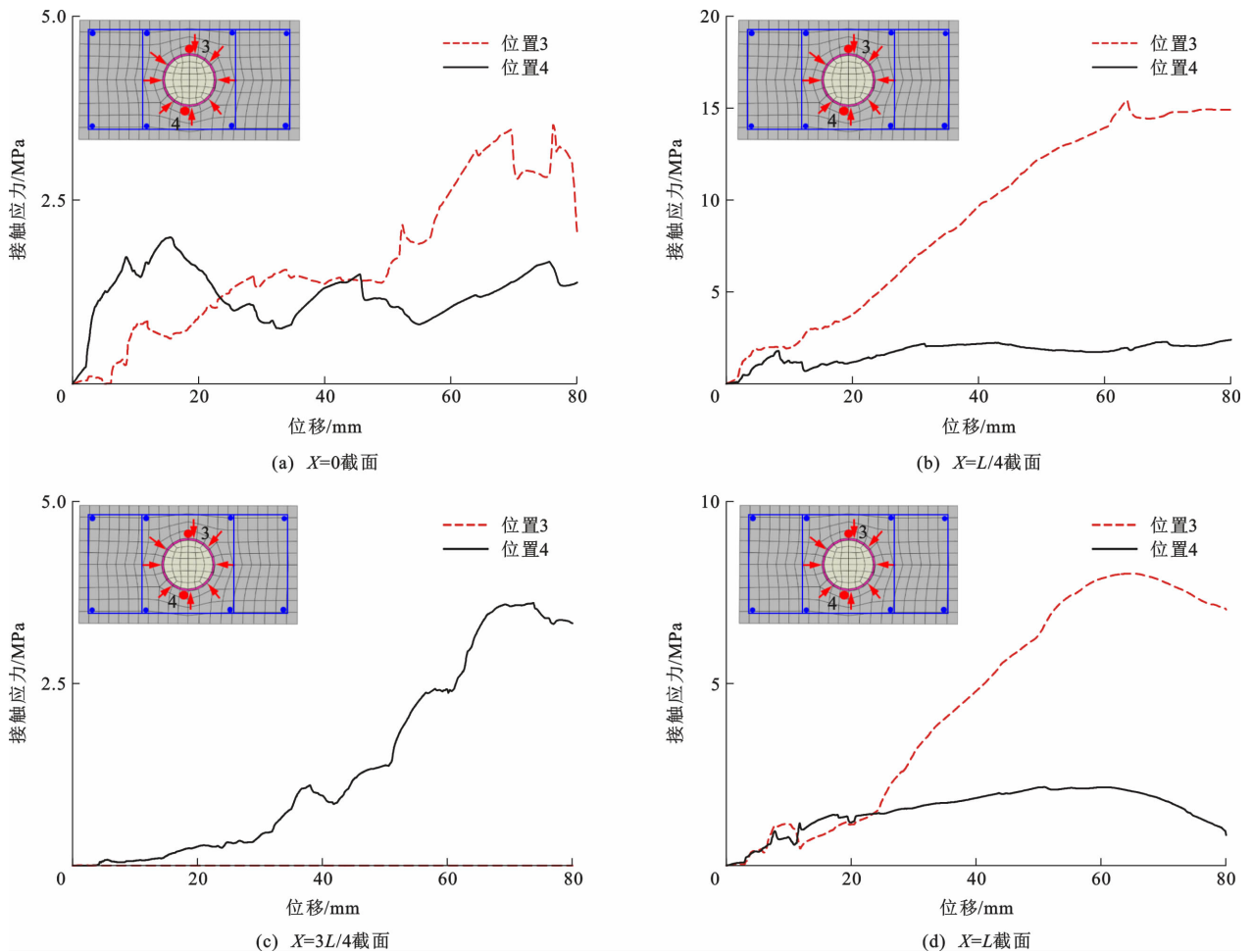


图 16 外包 RC 组分与内置 CFST 组分间的接触应力

Fig. 16 Contact stress between the externally wrapped RC component and the internally embedded CFST component

处(位置3)处的接触应力要大于下缘(位置4)。

结合第3.1节STRC拱的极限承载力大于内置CFST和外包RC承载力叠加值和有限元分析结果可知:STRC拱中内置CFST与外包RC间存在组合作用。其组合机理:外包RC在纵筋屈服后(B点以后),内置的CFST有效减缓裂缝的开展,二者协同受力;在钢管进入屈服状态后,内置CFST与外包RC二者的相互作用增强,尤其是在 $L/4$ 受压侧更为显著,使得STRC拱的承载能力得以提高。

4 结 语

(1)STRC拱在 $L/4$ 截面单点集中力作用下,其受力全过程与RC拱相似,可分为弹性阶段、裂缝开展阶段和破坏阶段。模型拱在 $L/4$ 加载点、 $3L/4$ 和两拱脚等关键截面分别出现4个塑性铰,以加载点 $L/4$ 截面破坏最为严重。各材料应变分析表明,当拱达到极限承载力时,4个关键截面的混凝土均达到极限应变,钢管和纵筋则均已受拉屈服。

(2)STRC拱、RC拱与CFST拱在 $L/4$ 截面单点集中力作用下,均表现为反对称的变形形态。由于内置CFST的存在,尽管STRC拱的极限承载力与开裂后的受压刚度稍大于RC拱,但二者极限承载力时的变形基本一致,荷载-挠度曲线在弹性阶段也重合且整体趋势接近,其受力性能与RC拱更为接近。相反,STRC拱的面内刚度与极限承载力远大于CFST拱,二者的受力性能差异较大。因此,将不考虑初应力的CFST美兰拱称为STRC拱较之CE-CFST更合理。

(3)试验结果表明:STRC拱达到极限承载力时,外包RC拱也接近其极限承载力,承载力已充分发挥,而内置CFST拱仍处于弹塑性阶段,承载力未充分发挥且对STRC拱的承载力贡献较小。无论同步或非同步状态下,外包RC拱与内置CFST拱承载力的叠加值均小于STRC拱的极限承载力,二者存在组合作用。

(4)有限元结果表明:STRC拱在外包混凝土开裂后,截面发生应力重分布,外包RC组分与内置CFST组分间的接触应力均增大,相互作用显著。结合试验与有限元分析,在STRC拱的极限承载力计算时应考虑外RC和内置CFST的同步受力和二者的组合作用。

(5)本文初步探讨了STRC拱的受力性能与受力机理,但试验参数单一,可进一步增加试验数量,拓展参数,揭示面积比与纵筋率等参数对STRC拱受力性能的影响机理。同时,针对STRC拱极限承

载力的计算方法,尚需结合试验结果与数值分析进行系统研究,建立适用于STRC拱极限承载力计算的简化算法,为工程设计提供理论依据。

参 考 文 献 :

References :

- [1] 陈宝春,何福云,李 聪,等.美兰法与美兰拱桥技术发展综述[J].交通运输工程学报,2022,22(6):1-24.
CHEN Bao-chun, HE Fu-yun, LI Cong, et al. Review on technical development of Melan method and Melan arch bridges[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2022, 22(6): 1-24.
- [2] 陈宝春,张梦娇,刘君平,等.我国混凝土拱桥应用现状与展望[J].福州大学学报(自然科学版),2021,49(5):716-726.
CHEN Bao-chun, ZHANG Meng-jiao, LIU Jun-ping, et al. Application and prospects of concrete arch bridges in China [J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2021, 49(5): 716-726.
- [3] 姜 磊,刘永健,周绪红,等.钢管混凝土组合结构桥梁设计原理与技术发展综述[J].中国公路学报,2025,38(3):278-302.
JIANG Lei, LIU Yong-jian, ZHOU Xu-hong, et al. Design principles and technological development of concrete-filled steel tube composite bridges[J]. China Journal of Highway and Transport, 2025, 38(3): 278-302.
- [4] 陈宝春,刘君平.世界拱桥建设与技术发展综述[J].交通运输工程学报,2020,20(1):27-41.
CHEN Bao-chun, LIU Jun-ping. Review of construction and technology development of arch bridges in the world[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2020, 20(1): 27-41.
- [5] 韦建刚,陈宝春,刘永健,等.近十年我国桥梁组合结构研究与应用进展[J].福建理工大学学报,2025,23(1):1-32.
WEI Jian-gang, CHEN Bao-chun, LIU Yong-jian, et al. Review of bridge composite structures in China in the last decade [J]. Journal of Fujian University of Technology, 2025, 23(1): 1-32.
- [6] 刘君平,杨 倩,刘华龙,等.钢管混凝土桁肋内栓钉K型节点应力集中特性[J].交通运输工程学报,2024,24(6):106-120.
LIU Jun-ping, YANG Qian, LIU Hua-long, et al. Stress concentration characteristics of concrete-filled steel tubular truss-rib K-joint with inner studs[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2024, 24(6): 106-120.
- [7] 郑皆连.我国大跨径混凝土拱桥的发展新趋势[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2016,35(增1):8-11.
ZHENG Jie-lian. New development tendency of large-span reinforced concrete arch bridges in China [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Sciences), 2016, 35(S1): 8-11.
- [8] 赵人达,张正阳.我国钢管混凝土劲性骨架拱桥发展综述[J].桥梁建设,2016,46(6):45-50.
ZHAO Ren-da, ZHANG Zheng-yang. A summary of development of concrete-filled steel tube framed arch bridges in China[J]. Bridge Construction, 2016, 46(6): 45-50.
- [9] ZHENG J L, WANG J J. Concrete-filled steel tube arch

- bridges in China[J]. *Engineering*, 2018, 4(1): 143-155.
- [10] HE F Y, LI C, CHEN B C, et al. Compressive behavior of concrete-encased CFST column with initial stress[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2023, 201: 107724.
- [11] 蓝佳玉. 初应力对钢管混凝土劲性骨架拱桥极限承载力的影响研究[D]. 南宁: 广西大学, 2022.
LAN Jia-yu. Research on influence of initial stress on ultimate bearing capacity of rigid frame concrete arch bridge [D]. Nanning: Guangxi University, 2022.
- [12] TU B, LI Y, CAI S Y. Axial compressive behavior of concrete-encased CFST stub columns with high-level two-stage initial stresses[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2022, 27(12): 04022116.
- [13] 韩 玉. 钢管拱桥管内混凝土真空辅助灌注试验及实桥应用[J]. *桥梁建设*, 2015, 45(2): 19-25.
HAN Yu. Tests of vacuum-aided casting of concrete in tubes of a CFST arch bridge and application of the casting to actual bridges[J]. *Bridge Construction*, 2015, 45(2): 19-25.
- [14] 郑皆连, 王建军, 冯 智, 等. 钢管混凝土拱段真空辅助灌注工艺试验[J]. *中国公路学报*, 2014, 27(6): 44-50.
ZHENG Jie-lian, WANG Jian-jun, FENG Zhi, et al. Vacuum aided concrete grouting process test of concrete filled steel tube arch segment[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2014, 27(6): 44-50.
- [15] 郑皆连. 在劲性拱骨架上实现混凝土连续浇注的探讨[J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2011, 30(增 2): 1099-1105, 1158.
ZHENG Jie-lian. Discussion on placing concrete uninterruptedly on Closure Arch rigid skeleton[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Sciences)*, 2011, 30(S2): 1099-1105, 1158.
- [16] 林春姣, 郑皆连. 劲性骨架拱桥主拱圈混凝土四工作面浇筑法[J]. *交通运输工程学报*, 2020, 20(6): 82-89.
LIN Chun-jiao, ZHENG Jie-lian. Four-working-platform pouring method for main arch ring concrete of rigid skeleton arch bridge[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2020, 20(6): 82-89.
- [17] 童加明, 邓年春, 林春姣, 等. 大跨径钢管混凝土劲性骨架拱桥外包混凝土浇筑顺序研究[J]. *公路*, 2020, 65(7): 92-97.
TONG Jia-ming, DENG Nian-chun, LIN Chun-jiao, et al. Study of the outer concrete casting sequence for long span concrete arch bridges with a CFST stiff skeleton[J]. *Highway*, 2020, 65(7): 92-97.
- [18] 吴海军, 王藐民, 陆 萍. 劲性骨架混凝土拱桥外包混凝土分环浇筑方案对结构受力的影响[J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2017, 36(11): 1-6.
WU Hai-jun, WANG Miao-min, LU Ping. Influence of pouring cycle schemes of externally wrapped concrete of concrete arch bridge with stiff skeleton on structure mechanics[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Sciences)*, 2017, 36(11): 1-6.
- [19] 张富贵, 张永水, 董 义, 等. 大跨劲性骨架拱桥外包混凝土浇筑方案[J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2012, 31(2): 210-213, 238.
ZHANG Fu-gui, ZHANG Yong-shui, DONG Yi, et al. Outsourcing concrete pouring scheme of long-span stiff skeleton arch bridge[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Sciences)*, 2012, 31(2): 210-213, 238.
- [20] 杨国静, 徐 勇, 黄 毅. 大跨度劲性骨架拱桥外包混凝土方案优化[J]. *铁道工程学报*, 2017, 34(10): 50-54, 82.
YANG Guo-jing, XU Yong, HUANG Yi. The outer-covered concrete construction scheme optimization of the long-span concrete arch bridge with stiff skeleton[J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2017, 34(10): 50-54, 82.
- [21] 李长胜, 邓年春, 林春姣, 等. 劲性骨架拱桥施工过程拱圈力学行为分析[J]. *桂林理工大学学报*, 2022, 42(4): 871-877.
LI Chang-sheng, DENG Nian-chun, LIN Chun-jiao, et al. Analysis of mechanical behavior of arch ring during construction of stiff skeleton arch bridge [J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 2022, 42(4): 871-877.
- [22] 陈锦阳. 拱形钢管混凝土加劲混合结构力学性能与设计方法研究[D]. 北京: 清华大学, 2020.
CHEN Jing-yang. Performance and design method of arched concrete-encased concrete-filled steel tubular (CFST) structures[D]. Beijing: Tsinghua University, 2020.
- [23] HE F Y, LI C, CHEN B C, et al. Axial compression behavior of steel tube reinforced concrete column [J]. *Engineering Structures*, 2024, 303: 117548.
- [24] HE F Y, LI C, SHEN W, et al. Compressive behavior of steel tube reinforced concrete column under eccentric loads [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2024, 219: 108787.
- [25] 邓宝春, 韦建刚, 林 英. 管拱面内两点非对称加载试验研究[J]. *土木工程学报*, 2006, 39(1): 43-49.
CHEN Bao-chun, WEI Jian-gang, LIN Ying. Experimental study on tubular Arches under unsymmetrical two concentrically in-plane loads[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2006, 39(1): 43-49.
- [26] AN Y F, HAN L H, ROEDER C. Performance of concrete-encased CFST box stub columns under axial compression[J]. *Structures*, 2015, 3: 211-226.
- [27] HAN L H, AN Y F. Performance of concrete-encased CFST stub columns under axial compression [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2014, 93: 62-76.
- [28] 韩林海, 牟廷敏, 王法承, 等. 钢管混凝土混合结构设计原理及其在桥梁工程中的应用[J]. *土木工程学报*, 2020, 53(5): 1-24.
HAN Lin-hai, MU Ting-min, WANG Fa-cheng, et al. Design theory of CFST (concrete-filled steel tubular) mixed structures and its applications in bridge engineering [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2020, 53(5): 1-24.
- [29] HAN L H, ZHAO X L, TAO Z. Tests and mechanics model for concrete-filled SHS stub columns, columns and beam-columns [J]. *Steel and Composite Structures*, 2001, 1(1): 51-74.
- [30] CHEN J Y, LI W, HAN L H, et al. Structural behaviour of concrete-encased CFST box stub columns under axial compression[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2019, 158: 248-262.
- [31] BAL TAY P, GJELSVIK A. Coefficient of friction for steel on concrete at high normal stress[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 1990, 2(1): 46-49.