轻量化预制大悬臂波形腹板盖梁抗弯承载力分析

党宇飞[1]， 李斐然[2]， 袁 波[2]， 贾俊峰[1]

(1.北京工业大学 城市与工程安全减灾教育部重点实验室,北京 100124;
2.河南省中工设计研究院集团股份有限公司,河南 郑州 451450)

摘要:为解决传统大悬臂混凝土盖梁自重大、运输与吊装困难及难以实现整体预制装配等工程问题,前期研究已提出一种轻量化预制大悬臂波形钢腹板盖梁结构并完成了弹性阶段足尺模型静力加载试验。现采用ABAQUS软件建立大悬臂波形钢腹板盖梁结构有限元模型并基于试验结果验证了模型的准确性。在此基础上,分析混凝土强度、预应力筋配筋水平及波形钢腹板厚度等参数对结构抗弯承载力及受力性能的影响规律,并采用现行规范方法对结构抗弯承载力进行验算。研究结果表明:该结构在极限状态下呈现典型受拉控制弯曲破坏模式,具有良好的延性性能;混凝土强度的提升对峰值承载力的增益效果较为有限,当混凝土强度等级从C50增加到C60时,峰值承载力提高2.9%;当混凝土强度等级从C60增加到C70时,峰值承载力仅提高1.9%。预应力钢束直径是承载力的主控因素,当钢束直径从12.7 mm增加到17.8 mm时,峰值承载力显著提升14.7%。腹板厚度在满足局部稳定性的前提下对抗弯极限承载力的影响较小,该结构在极限状态下抗弯与抗剪受力机理相对独立。规范验算结果与有限元分析结果对比表明,该类结构抗弯承载力具有约1.34的平均安全系数,计算结果偏于保守且稳定。

关键词:轻量化预制装配盖梁;大悬臂盖梁;波形钢腹板;抗弯性能;足尺试验;数值仿真模型
中图分类号:U443.2 **文献标志码**:A **文章编号**:2095-0373(2026)02-0008-07

0 引言

近年来,装配式与轻量化设计已成为桥梁结构发展的重要方向[1-2]。大悬臂盖梁作为连接桥墩与上部结构的关键受力构件,其受力性能与承载能力直接关系到桥梁结构的整体安全。相较于传统现浇结构,预制装配式大悬臂盖梁在结构体系、受力路径及施工方式等方面均发生显著变化,使结构内力传递机制与破坏模式更加复杂。现有设计方法多基于传统实心结构建立,难以直接适用于该类新型结构。因此,如何在保证结构性能的前提下实现轻量化与装配化,并合理评估其极限受力行为,成为当前研究的关键问题。国内外学者开展了多种结构形式探索。在预制拼装技术方面,分段预制[3-5]虽可降低单件吊装质量,但接缝处易产生病害且传力不连续,影响结构耐久性。在截面轻量化方面,Mckee et al[6]研究表明,内部空腔全预制盖梁虽极限承载力与实心截面接近,但更易发生剪切开裂,且空腔引起的内力重分布会影响破坏机制;黄志群[7]提出U型开口截面以优化受力;贾俊峰等[8]、Ye et al[9]将UHPC应用于大悬臂空心盖梁,结果表明其抗弯承载力仍主要由预应力筋控制。上述研究虽在一定程度上实现了结构减重,但复杂截面形式对施工质量控制提出了更高要求。预制模壳-现浇填芯结构可利用外壳作为模板实现快速施工。Chung et al[10]表明其整体受力性能与现浇结构基本一致;李嘉维等[11]及贾俊峰等[12-13]进一步采用UHPC外壳,显著提升了承载力与刚度。然而,由于预制外壳与填芯混凝土龄期差异,界面协同受力与变形协调问题仍有待解决。在组合结构方面,钢-混组合结构已广泛应用于桥梁工程。周强等[14]研究表明,在预制盖梁中引入钢腹板可显著提高抗剪承载力及延性。但随着工程应用的增加,传统钢-混组合

收稿日期:2026-03-21 **责任编辑**:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztddxxbzrb.20260051
基金项目:国家自然科学基金面上项目(51778024);河南省重点研发专项项目(231111241500);中原科技创新领军人才项目(244200510019)
作者简介:党宇飞(2001—),男,硕士研究生,研究方向为装配式桥梁。E-mail:19374958331@163.com
党宇飞,李斐然,袁波,等.轻量化预制大悬臂波形腹板盖梁抗弯承载力分析[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2026,39(2):8-14,99.

中国知网 https://www.cnki.net

结构在负弯矩区混凝土易开裂的问题逐渐凸显,制约了其进一步发展。

波形钢腹板结构因其优良的抗剪性能与几何稳定性,为解决上述问题提供了新的思路[15-18]。与传统混凝土腹板或平直钢板相比,波形钢腹板具有较高的面外刚度,可减少加劲构造并有效降低结构自重;其在受压状态下具有“手风琴效应”,纵向刚度极小,基本不承担轴向正应力,有利于改善结构受力分布并提高预应力利用效率。然而,现有研究主要集中于长跨度受弯构件,对于剪跨比较小、受力状态更为复杂的大悬臂盖梁,其受力机理及极限承载力计算方法仍缺乏系统研究。

针对上述问题,作者前期研究已提出一种轻量化预制大悬臂波形钢腹板盖梁[19],并通过足尺静力加载试验验证了其在正常使用极限状态下的受力性能。在此试验基础上,建立并验证 ABAQUS 精细化有限元模型,对结构极限受弯行为进行分析;进一步系统研究了混凝土强度、预应力配置水平及波形钢腹板厚度等关键参数对抗弯承载力的影响规律;最后基于现行规范方法对大悬臂结构的抗弯承载力进行验算与适用性评估,验证了现行设计方法在该类结构中的适用性。研究成果可为大悬臂波形钢腹板盖梁的工程设计提供参考。

1　大悬臂波形钢腹板盖梁有限元模型

1.1　研究对象与模型参数

为保证盖梁数值仿真模型与理论分析的可靠性,以前期完成静力加载试验的足尺轻量化大悬臂波形钢腹板盖梁为研究原型[19]。足尺试验的试件设计、加载制度、测点布置、试验现象已在文献[19]中说明,本文仅提取其试件几何参数、材料性能及关键响应数据用于有限元建模与验证。该试件按实际工程构件等比例设计,试件模型如图 1 所示,全长 32 m,悬臂长度为 12 m,截面高度由端部 1.9 m 渐变至根部 3.1 m。截面内部均匀布设 8 道钢横隔板,顶板内对称配置 9 束(1×17 Φ15.2)高强预应力钢绞线。基于该足尺试件的实测几何参数及材料性能数据,建立三维非线性有限元模型,并据此开展后续极限抗弯承载力分析与理论计算模型推导。

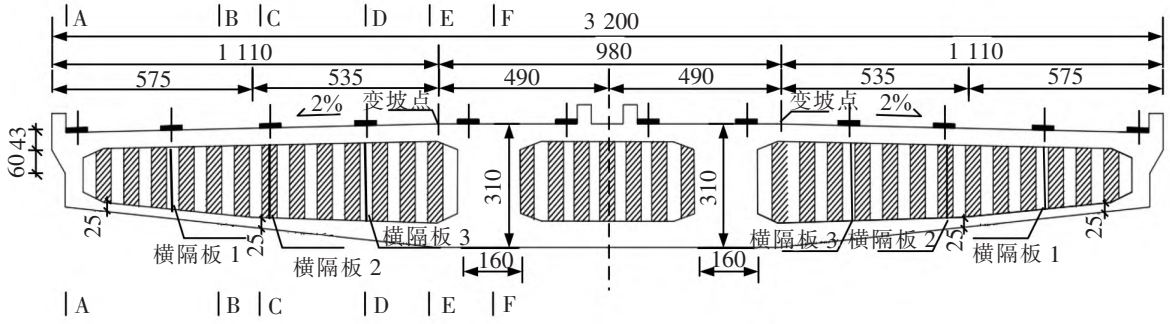


图 1　大悬臂波形钢腹板盖梁足尺试件模型(单位:mm)

1.2　有限元模型建立

基于足尺试验原型,采用 ABAQUS 软件建立轻量化预制大悬臂波形钢腹板盖梁的三维非线性有限元模型,如图 2 所示。模型几何尺寸、构造形式及材料参数均依据试验实测数据进行构建,以确保数值分析结果的可靠性。混凝土部分采用八节点实体单元(C3D8R)进行离散,能够较好地模拟结构在复杂受力状态下的非线性行为;波形钢腹板采用四节点壳单元(S4R)进行建模,以反映其几何非线性特征;普通钢筋及预应力钢束通过嵌入式单元(Embedded Region)方式与混凝土实现协同工作。材料本构方面,混凝

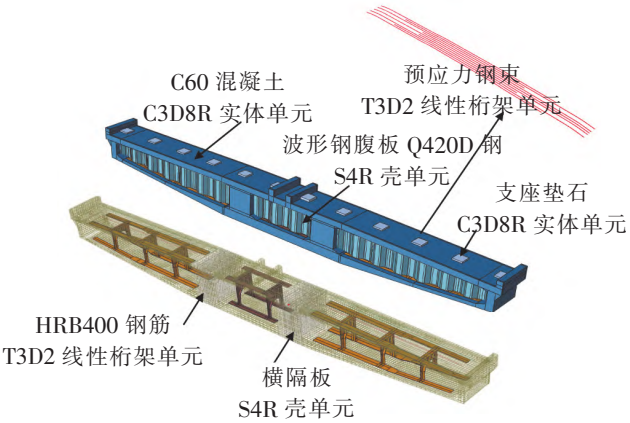


图 2　有限元模型

中国知网　https://www.cnki.net

土采用损伤塑性模型[20](Concrete Damaged Plasticity, CDP),相关参数根据试验材料性能确定;钢筋与预应力钢束均采用理想弹塑性模型进行模拟。在界面处理方面,波形钢腹板与混凝土之间采用接触模拟,法线方向设置为限制单元相互穿透的"硬接触"模式,切线方向则引入基于罚函数(Penalty)的摩擦定律来模拟界面滑移;预应力通过等效初始应力法施加,以模拟张拉过程对结构受力状态的影响。

1.3 模型验证

提取前期已完成的足尺静力加载试验数据,与模拟结果进行对比分析。在设计荷载(2 300 kN)范围内,由图 3 可知,有限元(FEM)计算得到的挠度响应与试验结果吻合良好,表明所建立模型能够较准确地反映结构整体刚度。由图 4 可知,沿截面高度方向,纵向应变呈现良好的线性分布规律,与试验结果基本一致,说明截面受弯过程中满足拟平截面假定。同时,波形钢腹板的纵向应变显著低于混凝土翼缘,表现出典型的"手风琴效应",表明其在受弯过程中基本不承担轴向正应力。上述结果表明,所建立的有限元模型能够较合理地模拟该结构的受力行为,可用于后续分析。

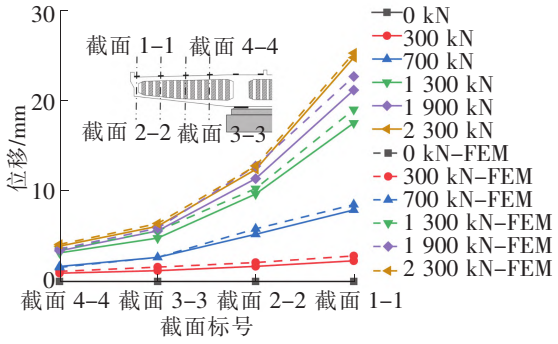


图 3 不同截面荷载-位移曲线

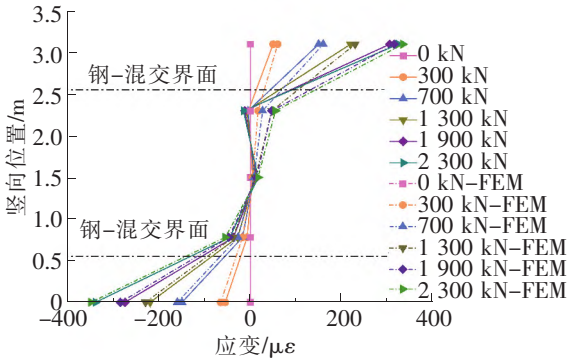


图 4 跨中截面纵向应变沿梁高分布对比

2 极限受弯行为与破坏机理分析

2.1 极限加载工况与分析方法

本工程大悬臂盖梁的设计主控目标为正常使用极限状态,侧重变形控制、刚度及抗裂性能,足尺试验仅重点评估了设计荷载下的使用性能而未进行破坏性加载。为全面探明结构在极限状态下的受力机理,在有限元模型验证的基础上,采用位移控制的两点对称竖向加载法,对模型施加极限荷载直至破坏。分析关键截面的位移与应力应变分布、混凝土损伤演化及钢筋屈服过程,系统揭示了该构件从弹性阶段至极限破坏的全过程受力行为。

2.2 全过程荷载-位移曲线

提取数值计算结果,悬臂端荷载-位移曲线如图 5 所示。根据曲线整体形态及结构关键材料非线性演化特征,盖梁在极限加载过程中的受力响应可划分为以下 3 个阶段:

(1)弹性阶段(*OA* 段)。在加载初期(0~8 635 kN),悬臂端荷载-位移关系呈近似线性增长,结构整体刚度保持稳定。此阶段混凝土处于全截面受压状态,尚未出现宏观拉裂现象;波形钢腹板处于弹性剪切工作状态,未发生塑性发展。结构整体刚度主要由混凝土顶、底板的轴向刚度以及波形钢腹板提供的等效抗剪刚度共同决定。

(2)带裂缝的非线性发展阶段(*AB* 段)。当荷

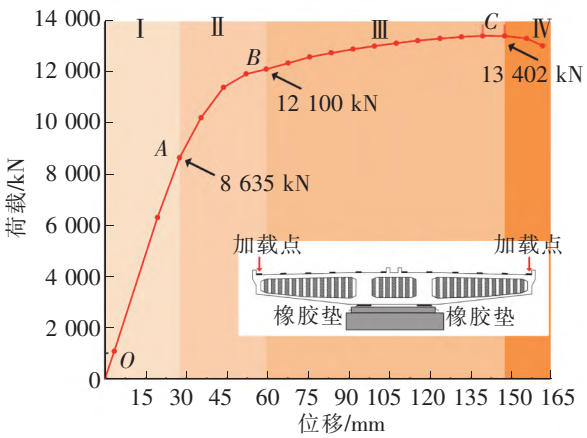


图 5 荷载-位移曲线

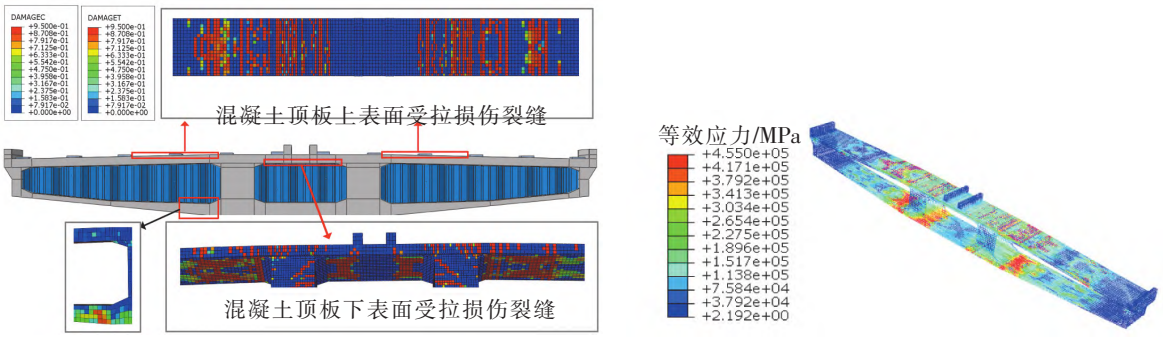
中国知网 https://www.cnki.net

载增大至约 12 100 kN 时,荷载-位移曲线斜率开始减小,结构刚度出现明显退化。悬臂根部负弯矩区顶板混凝土拉应力达到抗拉强度,受拉区出现裂缝并逐步向周围扩展,截面进入开裂工作状态。此时截面内力发生重分布,拉区内力逐渐由纵向钢筋及预应力筋承担,中性轴位置相应下移。该阶段内,波形钢腹板尚未发生屈服,整体承载力仍随位移增加而持续提高。

(3)屈服与破坏阶段(*BC* 段)。随着位移进一步增大,悬臂根部关键截面受拉区纵向钢筋达到屈服强度,截面内形成稳定的塑性铰区域,结构整体刚度显著降低。当荷载达到峰值 13 402 kN 时,混凝土受压区进入明显的损伤软化阶段,结构达到极限承载力,对应悬臂端位移约为 147 mm。峰值之后,荷载-位移曲线进入下降段,承载力随位移增加逐步降低,结构整体进入破坏阶段。

2.3　塑性开展与损伤演化分析

将模型加载到破坏,有限元计算结果如图 6 所示。由图 6 可知,轻量化预制波形钢腹板盖梁破坏始于悬臂根部,该截面为弯矩最大截面。加载初期,受拉区混凝土顶板上表面出现细微裂缝,受压侧混凝土因变形超出其极限压应变而发生压溃破坏;随后,受拉区的纵向预应力筋和普通钢筋达到屈服强度,结构变形急剧增大,顶板区域裂缝密集开展并贯通。受压区混凝土因达到极限压应变而压碎剥落,导致承载力丧失。模型未产生明显的剪切斜裂缝。综上,该盖梁的最终破坏形态为发生在悬臂根部的正截面弯曲破坏,是具有良好失效预警的受拉控制破坏模式,验证了结构设计的合理性。



(a) 混凝土失效状态　　(b) 钢筋应力

图 6　模拟破坏模式

3　抗弯极限承载力参数影响分析

3.1　混凝土强度

基于经过试验测试结果验证的有限元仿真模型,保证模型其他参数不变,对混凝土强度等级(C50、C60、C70)进行敏感性分析,经整理得到盖梁模型的极限承载力随混凝土强度的变化曲线,如图 7 所示。从图 7 可以看出,在弹性加载初期,混凝土强度等级的提升对结构刚度的增益微乎其微。进入塑性阶段后,虽然承载力随强度等级提升而增加,但幅度十分有限:混凝土强度等级从 C50 增加到 C60,极限荷载从 13 024 kN 增加到13 402 kN,仅提升了 2.9%;当混凝土强度等级从 C60 增加到 C70,极限荷载从13 402 kN增加到 13 657 kN,仅提升了 1.9%。这表明,混凝土强度等级对盖梁的极限承载力的贡献十分有限。在工程上对于此类受拉控制的构件,设计时应更关注服役阶段的刚度与抗裂性能,通过提高混凝土标号来提升极限抗弯承载力是不经济的。

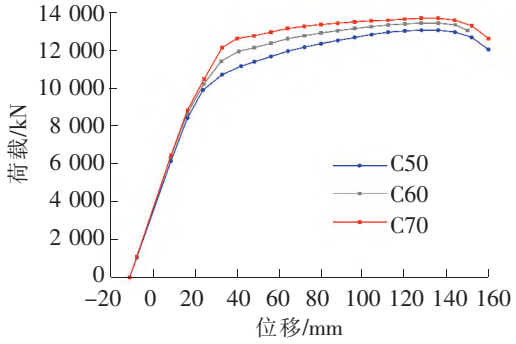


图 7　不同混凝土强度的荷载-位移曲线

3.2　预应力筋配筋率

预应力筋作为承担弯矩的主力,其配筋率的变化对结构性能具有决定性影响。通过改变钢束直径(12.7、15.6、

中国知网　https://www.cnki.net

17.8 mm)来模拟不同配筋水平,模拟结果如图 8 所示。从图 8 可以看出,随着配筋率的提升,荷载-位移曲线的强化段斜率显著增大,表明结构极限承载力得到有效增强。相较于基准模型(15.6 mm 钢束),采用 17.8 mm 钢束可使极限承载力提升 5%(达 14 072 kN),而降级使用12.7 mm 钢束则导致承载力跌落约 8%(达 12 265 kN)。总体而言,承载力与配筋率呈现出显著的正相关特性。因此,在工程实践中,调节预应力筋用量是控制大悬臂盖梁抗弯能力最直接、最高效的技术手段。在承载力不足时优先增加配筋,而在安全储备过大时则可适当优化以降低成本。

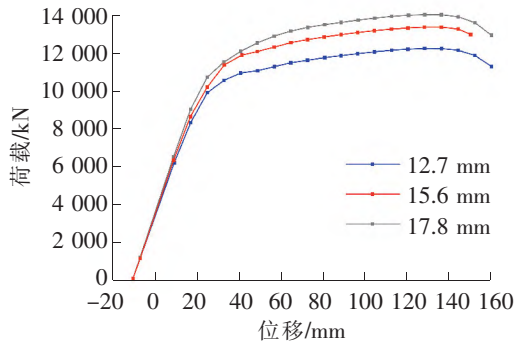


图 8 不同直径预应力钢束的荷载-位移曲线

3.3 波形钢腹板厚度

在不改变其他参数的条件下,分别对波形钢腹板厚度进行 ±2 mm 和 ±4 mm 的调整。图 9 显示,不同厚度方案的荷载-位移曲线高度吻合,峰值承载力仅出现轻微波动,说明腹板厚度对抗弯承载力的贡献相对有限。原因是在盖梁结构体系中,腹板主要承受界面的剪力,在稳定性足够的情况下对抗弯极限承载力几乎没有影响。由计算结果可知,在满足抗剪承载力和局部稳定性的前提下,将波形钢腹板设计得尽可能薄,可最大程度地减轻结构自重,但不得低于规范最小值 12 mm[21]。钢腹板在实际工作中处于中间应力大、两边应力小的非均匀受力状态,因此钢腹板边缘厚度可以略低于中间厚度。

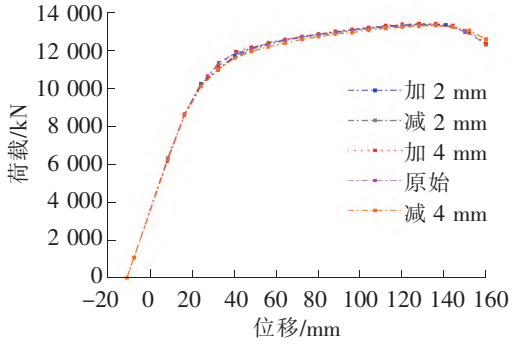
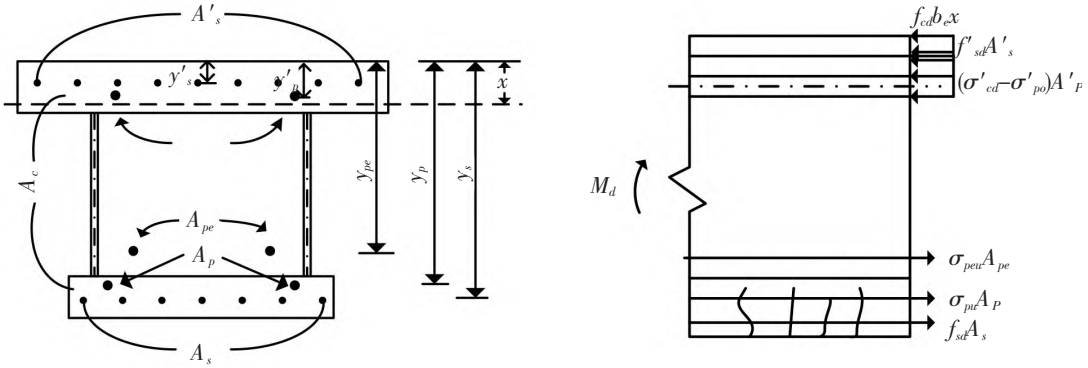


图 9 不同钢腹板厚度的荷载-位移曲线

4 抗弯承载力理论计算分析

极限抗弯承载力是评估结构安全储备与指导工程设计的核心指标。鉴于波形钢腹板独特的几何构造,存在显著的“手风琴效应”,其纵向刚度极小,基本不承担轴向正应力。本研究基于国内外相关组合结构设计理论[22-25],对现行规范方法在该类结构中的适用性进行验算与评估。该计算模型基于以下假定:①波形钢腹板与上下混凝土翼缘板之间连接可靠,界面无相对滑移,整体界面变形符合拟平截面假定。②考虑波形钢腹板的“手风琴效应”,忽略其在抗弯过程中承担的法向应力,认为弯矩仅由混凝土翼板、普通钢筋及预应力筋构成的组合截面承担。③受拉区混凝土开裂后退出工作,不计其抗拉强度;受压区混凝土及钢材的本构关系采用等效矩形应力图进行简化计算。

基于上述假定,截面极限抗弯承载力可通过截面内力平衡方程推导得出,计算简图见图 10。



(a)截面几何参数及配筋布置 (b)截面内力平衡示意

图 10 正截面抗弯承载力计算图示

中国知网 https://www.cnki.net

通过对受拉钢筋合力点取矩 $\sum M_u = 0$ 。

$$M_u = f_{cd} b_e x \left(x - \frac{y'_s}{2} \right) + A'_p (\sigma'_{pd} - \sigma_{p0})(x - y'_p) + f'_{sd} A'_s (x - y'_s) + f_{sd} A_s (y_s - x) + A_p \sigma_{pu} (y_p - x) + A_{pe} \sigma_{peu} (y_{pe} - x) \tag{1}$$

由 $\sum H = 0$,得

$$f_{sd} A_s + A_p \sigma_{pu} + A_{pe} \sigma_{peu} = f_{cd} b_e x + A'_p (\sigma'_{pd} - \sigma_{p0}) + f'_{sd} A'_s \tag{2}$$

式(1)、式(2)须满足

$$2y'_s < x \leqslant \xi h_0 \tag{3}$$

式中,M_u 为极限弯矩;f_{cd} 为混凝土抗压强度设计值;b_e 为顶板有效宽度;x 为界面受压区高度;σ'_{pd} 为受压区体内预应力束抗压强度设计值;σ_{p0} 为受压区混凝土应力为 0 时,受压区体内预应力束应力;y'_p 为受压区体内预应力束到截面顶距离;f'_{sd} 为受压区普通钢筋抗压强度设计值;A'_s 为受压区普通钢筋面积;A'_p 为受压区体内预应力筋面积;y'_s 为受压区普通钢筋到截面顶距离;f_{sd} 为受拉区普通钢筋抗拉强度设计值;A_s 为受拉区普通钢筋面积;A_p 为受压区体内预应力筋面积;A_{pe} 为体外预应力筋面积;y_s 为受拉区普通钢筋到截面顶距离;σ_{pu} 为受拉区体内预应力束抗拉强度极限值;y_p 为受拉区预应力束到截面顶距离;σ_{peu} 为体外束极限应力值;y_{pe} 为体外束到截面顶距离;h_0 为截面有效高度;ξ 为波形钢腹板盖梁相对界限受压区高度。

将本文材料参数及结构尺寸带入式(1)、式(2),不考虑体外预应力钢束作用,验算轻量化波形钢腹板盖梁抗弯承载力。由表 1 可知,基于“拟平截面”和“完全忽略腹板刚度”的简化理论计算值均低于有限元模拟值,平均比值(即安全储备系数)约为 1.34。这表明现有简化公式在应用于该类新型结构时具有较为稳定的安全余量。

表 1　峰值承载力有限元结果和理论计算值比较

工况编号	混凝土强度	预应力筋直径/mm	有限元分析/(kN·m)	理论计算值/(kN·m)	M 有限元/M 理论
C60-D15.6	C60	15.6	93 814	68 909	1.36
C50-D15.6	C50	15.6	91 168	67 532	1.35
C70-D15.6	C70	15.6	95 599	70 293	1.36
C60-D12.7	C60	12.7	85 855	66 552	1.29
C60-D17.8	C60	17.8	98 504	72 429	1.36

5　结论

(1)轻量化预制大悬臂波形钢腹板盖梁在梁端竖向荷载作用下最终呈现出典型的弯曲破坏模式,最不利截面位于悬臂根部截面,表现为受拉侧钢筋及预应力筋屈服、受压侧混凝土压碎;构件塑性发展充分,延性性能良好。

(2)大悬臂波形钢腹板盖梁预应力配置水平是控制其抗弯性能的主导因素;提高混凝土强度对抗弯极限承载力的提升效果有限;在满足局部稳定与抗剪要求的前提下,波形钢腹板厚度对抗弯极限承载力影响较小。

(3)当采用现行规范中基于平截面假定的正截面抗弯承载力计算方法时,计算结果整体偏于保守且离散性较小,平均安全系数约 1.34,可将该方法用于大悬臂波形钢腹板盖梁的抗弯承载力设计计算,也可为同类组合盖梁的承载力评估提供参考。

参　考　文　献

[1]《中国公路学报》编辑部. 中国桥梁工程学术研究综述·2021[J]. 中国公路学报,2021,34(2):1-97.

[2]陈彦江, 丁梦佳, 许维炳, 等. 预制拼装桥墩体系及其抗震性能研究进展[J]. 中国公路学报, 2022, 35(12):56-76.

中国知网　https://www.cnki.net

[3]徐栋，项海帆，黄鼎业，等. 装配式无粘结预应力混凝土盖梁模型试验[J]. 结构工程师，1999(1)：29-32.
[4]Li Guoping，Wang Jiaqi，Shen Yin，et al. Experimental study on the combined shear and bending behaviour of corbel joints in precast concrete segmental inverted-T caps[J]. Structures，2020，28：2367-2378.
[5]闫兴非，葛继平，王志强，等. 装配式大悬臂分段预应力混凝土盖梁抗弯性能研究[J]. 中国市政工程，2019(4)：72-76.
[6]Mckee C D，Lee J D，Birely A C，et al. Experimental behavior of pretensioned bent caps with internal voids for weight reduction[J]. Journal of Bridge Engineering，2020，25(1)：04019123.
[7]黄志群. 轻型装配式盖梁力学性能研究[D]. 上海：上海应用技术大学，2021：13-21.
[8]贾俊峰，王珺，吕文舒，等. 轻量化预制UHPC空心盖梁抗弯性能研究[J/OL]. 北京工业大学学报，2026-02-26. https://link-cnki-net-s-6. libziyuan1. bjut. edu. cn/urlid/11. 2286. T. 20251215. 1820. 002.
[9]Ye Meng，Li Lifeng，Hu Fangjian，et al. UHPC-based precast large-cantilevered thin-walled bent caps：design and experiments[J]. Engineering Structures，2022，272：114909.
[10]Chung C H，Lee J H，Kwon S H. Proposal of a new partially precast pier cap system and experimental verification of its structural performance[J]. KSCE Journal of Civil Engineering，2018，22：2362-2370.
[11]李嘉维，夏樟华，孙明松，等. UHPC模壳-RC叠合盖梁受力性能试验[J]. 中国公路学报，2021，34(8)：157-167.
[12]贾俊峰，张志鹏，吴志勇，等. 预应力预制模壳填芯混凝土盖梁抗弯承载力分析[J]. 河南科技大学学报(自然科学版)，2024，45(6)：54-61.
[13]贾俊峰，张福香，张瑞，等. 预制模壳填芯混凝土悬臂盖梁承载力分析[J]. 河南科技大学学报(自然科学版)，2024，45(3)：53-60.
[14]周强，李永君，刘思维，等. 新型预制拼装组合结构盖梁抗剪机理[J]. 建筑钢结构进展，2022，24(4)：7-14.
[15]Zhao Pin，Rong Xueliang，Shao Xudong，et al. Flexural performance of precast segmental continuous box girders with corrugated steel webs[J]. Journal of Constructional Steel Research，2024，216：108621.
[16]Moon J，Yi J，Choi B H，et al. Shear strength and design of trapezoidally corrugated steel webs[J]. Journal of Constructional Steel Research，2009，65(5)：1198-1205.
[17]Deng Hao，Shao Yongbo，Hassanein M F. Experimental shear testing of small-scale corrugated web girders used in conventional buildings[J]. Journal of Constructional Steel Research，2022，189：107086.
[18]许立言，郭婷，张屹垚，等. 曲线波形钢腹板组合箱梁空间受力性能研究[J]. 建筑结构学报，2023，44(增刊1)：165-173.
[19]李斐然，党宇飞，申士宇，等. 轻量化预制大悬臂波形钢腹板盖梁足尺模型抗弯性能试验研究[J/OL]. 北京工业大学学报，2026-03-21. https://link. cnki. net/urlid/11. 2286. t. 20260311. 1452. 002.
[20]GB 50010—2010 混凝土结构设计规范[S].
[21]GB 50917—2013 钢-混凝土组合桥梁设计规范[S].
[22]张鸿，郑和晖，王敏. 节段预制拼装波形钢腹板组合箱梁桥横向受力性能试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版)，2016，46(5)：1070-1075.
[23]CJJ/T 272—2017 波形钢腹板组合梁桥技术标准[S].
[24]韩恒涛. 节段预制拼装波形钢腹板连续箱梁抗弯性能研究[D]. 石家庄：石家庄铁道大学，2023：58-74.
[25]郑博文. 装配式波形钢腹板组合箱梁抗弯性能试验研究[D]. 石家庄：石家庄铁道大学，2021：69-72.

Analysis of Flexural Bearing Capacity of Lightweight Prefabricated Large-Cantilever Corrugated Steel Web Bent Caps

DANG Yufei[1]， LI Feiran[2]， YUAN Bo[2]， JIA Junfeng[1]

(1. Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering，Ministry of Education，Beijing University of Technology，Beijing 100124，China；
2. Henan Provincial Zhonggong Design and Research Institute Group Co. Ltd.，Zhengzhou 451450，China)

(下转第99页)

中国知网 https://www.cnki.net

2. Ordos Power Supply Company, Inner Mongolia Power Group, Ordos 017000, China;
3. Shanghai Aerospace Electronics Co. Ltd., Shanghai 200000, China)

Abstract: To meet the urgent demands for miniaturization and broadband performance in VHF/UHF military communications, a helmet-conformal ultra-wideband wearable antenna based on a polyimide flexible substrate was designed. The ellipsoidal helmet was equated to a sphere with a radius of 11.15 cm using the equal volume method, and based on this, a physical size constraint of 120 mm×110 mm×4 mm was established. The antenna originated from a planar monopole structure and was fed by a coplanar waveguide. Through the systematic optimization of key geometric parameters including the patch length, width, and bottom corner angle using the control variable method, excellent impedance matching was achieved. Simulation results based on the HFSS platform indicate that the antenna operates across the 70～900 MHz band, maintaining return loss $S_{11} \leqslant -10$ dB and VSWR≤2 throughout the entire range. The radiation patterns exhibit stable horizontal omnidirectionality in both E and H planes. Surface current distribution analysis reveals the adaptive mechanism of the current path evolving with frequency. Furthermore, a cylindrical bending model verifies the conformal robustness of the antenna under helmet curvature. This design balances small size, light weight, and radiation stability, providing an efficient engineering solution for military wearable communication devices.

Key words: VHF/UHF bands; military helmet; conformal antenna; miniaturization; surface current analysis

(上接第 14 页)

Abstract: To address the engineering challenges of traditional large-cantilever concrete bent caps, including excessive self-weight, difficulties in transportation and lifting, and the difficulty in achieving integral prefabricated assembly, a lightweight prefabricated large-cantilever bent cap structure with corrugated steel webs has been proposed in previous study, and a full-scale static loading test in the elastic stage has been completed. In this study, an ABAQUS finite element model of the large-cantilever bent cap structure with corrugated steel webs was established, and its accuracy was validated against the experimental results. On this basis, a parametric analysis was conducted to evaluate the effects of concrete strength, prestressing tendon reinforcement level, and corrugated steel web thickness on the flexural bearing capacity and mechanical performance of the structure. Additionally, the flexural bearing capacity was verified using current design code methods. The research results indicate that under the ultimate state, the structure exhibits a typical tension-controlled flexural failure mode with good ductility. Increasing the concrete strength provides limited enhancement to the peak bearing capacity. When the concrete strength grade increases from C50 to C60, the peak bearing capacity increases by 2.9%, and when it increases from C60 to C70, the capacity only increases by 1.9%. The diameter of the prestressing tendon is the dominant factor controlling the bearing capacity. Increasing the tendon diameter from 12.7 mm to 17.8 mm results in a significant 14.7% enhancement in the peak bearing capacity. Under the premise of satisfying local stability, the web thickness has a minor influence on the ultimate flexural bearing capacity, indicating that the flexural and shear mechanical mechanisms of the structure are relatively independent in the ultimate state. A comparison between the code-based verification results and the finite element analysis results demonstrates that the flexural bearing capacity of this type of structure possesses an average safety factor of approximately 1.34, indicating that the calculation results are conservative and reliable.

Key words: lightweight prefabricated bent caps; large-cantilever bent caps; corrugated steel web; flexural bearing capacity; full-scale test; numerical simulation model

中国知网　https://www.cnki.net