

DOI: 10.7672/sgjs2026100079

带肋混凝土叠合板受力性能模拟分析

吕国玉^{1,2}, 毛水芬³, 蔡金杰³, 叶钰蓉⁴, 王建民⁴

(1. 浙江建设职业技术学院, 浙江 杭州 311200; 2. 歌山建设集团有限公司,
浙江 杭州 310051; 3. 浙江振升建设有限公司, 浙江 湖州 313200;
4. 宁波大学土木工程与地理环境学院, 浙江 宁波 315000)

[摘要] 针对物流仓储荷载大、净空高的需求,带肋叠合板为理想的楼板形式。采用有限元软件数值模拟对直通型底部加劲肋叠合板与加劲肋端部收起叠合板的承载力和钢筋应变进行分析,并验证端部收起设计的合理性。结果表明:2 种模型的荷载-位移曲线均呈 3 阶段发展特征,底部加劲肋直通设计在受力性能上更具合理性。

[关键词] 混凝土;叠合板;预制构件;有限元分析

[中图分类号] TU528

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)10-0079-04

Numerical Simulation Analysis of Bearing Capacity of Ribbed Concrete Composite Slabs

LÜ Guoyu^{1,2}, MAO Shuifen³, CAI Jinjie³, YE Yurong⁴, WANG Jianmin⁴

(1. Zhejiang College of Construction, Hangzhou, Zhejiang 311200, China; 2. Geshan Construction Group Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 310051, China; 3. Zhejiang Zhensheng Construction Co., Ltd., Huzhou, Zhejiang 313200, China; 4. School of Civil Engineering and Geographical Environment, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315000, China)

Abstract: In view of the demand of large logistics storage load and high clearance, ribbed composite slab is an ideal floor form. The finite element software numerical simulation is used to analyze the bearing capacity and steel bar strain of the straight-through bottom stiffened rib composite plate and the stiffened rib end retracted composite plate, and the rationality of the end retracted design is verified. The results show that the load-displacement curves of the two models show three-stage development characteristics. The bottom stiffener straight-through design is more reasonable in mechanical performance.

Keywords: concrete; composite slab; prefabricated components; finite element analysis

0 引言

混凝土叠合板结构结合了预制装配式与现浇结构的优点,整体性好、抗裂和抗震性能优异^[1-2],且具有节约材料、施工便捷和工期短等优势^[3]。近年来,随着对叠合板的研究与应用不断深入,带肋混凝土叠合板逐渐受到关注。本文针对现代物流仓储建筑在有限空间内需同时提升结构承载力与空间使用效率的需求,开展端板承载式带肋叠合板的研究。该结构底板部分在工厂预制并养护,运至现场后浇筑混凝土层,形成带肋叠合板。孟宪宏等^[4]通过预应力带肋叠合板抗弯性能试验和 ABAQUS 有限元软件模拟分析,发现叠合板板肋能

有效替代桁架钢筋,且整体性能优越,预制生产简便。王庆华等^[5]对中部设肋的预应力叠合板进行均布加载试验,发现带肋构造在提高叠合板刚度和抑制裂缝发展方面能起到有效作用。倪东阳^[6]通过单跨单肋钢筋桁架混凝土叠合板试验与有限元分析,进一步表明肋条能增强底板刚度,抑制裂缝发展并限制变形。然而,现有研究多集中于等高单跨单向肋布置,对于多跨及受力良好的带肋构造研究尚不充分。因此,本文提出适用于现代物流仓储的端板承载式带肋叠合板,通过在梁端区域对加劲肋进行收束设计,实现在提高承载力的同时优化空间利用率,并采用有限元模拟对比分析底部加劲肋直通叠合板的承载力和钢筋变形等。

1 建立有限元模型

带肋叠合板端部肋收起模型的基本尺寸参数、配筋信息参考文献[7-9]选取。采用分配梁模拟均匀加载、预加载和正式加载。其中,预加载以荷载控制分为 3 级,以验证构件支承及受力的均匀可靠;正式加载以位移控制分为 10 级,通过支座及跨中位移发展控制。底部加劲肋直通模型材料属性与未直通的模型保持一致。混凝土采用 C3D8R 单元模拟,钢筋采用 T3D2 桁架单元模拟。为准确反映混凝土与钢筋之间的相互作用,在二者间定义“嵌入区域”约束。所有边界条件均与物理试验保持一致,加载制度为位移控制的静力加载,采用全牛顿迭代法求解该非线性问题。

设计 2 片带肋混凝土预制底板试件,利用 ABAQUS 有限元软件进行静荷载模拟,对比分析 2 个试验对象模型,重点考察其抗弯承载力及荷载-位移曲线特性。为提升计算效率,选取板宽的 1/5 建立有限元模型(见图 1)。模拟分析中,混凝土材料采用塑性损伤模型,依据 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》(2015 年版),确定其受压与受拉本构关系,同时引入混凝土单轴行为模型并计入损伤参数的影响。

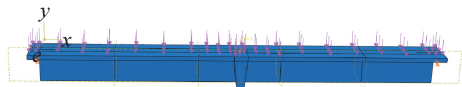


图 1 带肋混凝土叠合板有限元模型

Fig. 1 Finite element model of ribbed concrete composite slab

采用以上模型对分配梁集中荷载作用下的带肋预制底板和带肋混凝土叠合板进行数值模拟分析。混凝土单轴受拉本构计算如下:

$$\sigma = (1 - d_t) E_c \varepsilon \quad (1)$$

$$d_t = \begin{cases} 1 - \rho_t [1.2 - 0.2x^5] x \leq 1 \\ 1 - \frac{\rho_t}{\alpha_t (x - 1)^{1.7} + x} x > 1 \end{cases} \quad (2)$$

$$x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{t,r}} \quad (3)$$

$$\rho_t = \frac{f_{t,r}}{E_c \varepsilon_{t,r}} \quad (4)$$

式中: σ 为混凝土单轴应力; ε 为混凝土单轴应变; d_t 为混凝土单轴受拉损伤演化参数; E_c 为混凝土弹性模量; α_t 为混凝土单轴受拉参数值,依照规范取值; $f_{t,r}$ 为混凝土单轴抗拉强度代表值; $\varepsilon_{t,r}$ 为与 $f_{t,r}$ 对应的混凝土峰值拉应变,依照规范选取; ρ_t 为混凝土受拉峰值应力参数。

混凝土单轴受压本构计算如下:

$$\sigma = (1 - d_c) E_c \varepsilon \quad (5)$$

$$d_c = \begin{cases} 1 - \frac{\rho_c n}{n - 1 + x^n} x \leq 1 \\ 1 - \frac{\rho_c}{\alpha_c (x - 1)^2 + x} x > 1 \end{cases} \quad (6)$$

$$\rho_c = \frac{f_{c,r}}{E_c \varepsilon_{c,r}} \quad (7)$$

$$n = \frac{E_c \varepsilon_{c,r}}{E_c \varepsilon_{c,r} - f_{c,r}} \quad (8)$$

$$x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c,r}} \quad (9)$$

式中: α_c 为混凝土单轴受压参数值,按规范取用; $f_{c,r}$ 为混凝土单轴抗压强度代表值; $\varepsilon_{c,r}$ 为与 $f_{c,r}$ 对应的混凝土峰值压应变,按规范取用; d_c 为混凝土单轴受压损伤演化参数; ρ_c 为混凝土受压峰值应力参数; n 为受压上升段形状参数。

常见的钢筋应力-应变简化曲线主要包含理想弹塑性模型、双斜线型、三折线型及全曲线型 4 种类型^[8]。其中,理想弹塑性模型适用于混凝土结构破坏时钢筋应变未超过 1% 的情况,此时钢筋尚未进入强化阶段;双斜线模型具有形式简洁、应力与应变一一对应的特点,其二次强化刚度与弹性模量的比值通常较小^[9],在缺乏具体数值时可近似取 $E' = 0.01E_s$ 。依据《混凝土结构设计规范》(2015 年版),选用双斜线模型。C40 混凝土与 C50 混凝土的弹性模量分别取 32 500, 34 500 MPa;泊松比均取 0.2;膨胀角取 30°~40°,取较大值可提高构件承载力,改善收敛性,但会夸大混凝土的膨胀能力,本文取 30°;黏性参数能调整构件计算的精度和收敛性,取值 0.000 1~0.005,黏性参数越大,精度越高;偏心率为 0.1,拉压子午应力比 K 为 0.666 7;双轴/单轴抗压强度比 f_{bo}/f_{co} 为 1.16。

对网格进行敏感性分析,分别取网格大小为 100, 50, 25, 5 mm 等数值进行有限元模拟计算,得出对应的荷载-位移曲线,当所呈现的荷载-位移曲线不再发生较大变化时的最大网格大小即为计算精度、计算速率及计算准确性的平衡点。经过反复计算对比与分析,本文带肋叠合板长边以 25 mm 为单位进行划分, T 形截面高、宽以 20 mm 为单位进行划分。

2 结果分析

2.1 荷载-位移关系分析

通过有限元软件提供的混凝土受拉损伤与受压损伤,能直观了解带肋预制底板在静荷载受弯试

验中裂缝的生成与发展及带肋混凝土板的破坏过程。

取左、右侧肋端部及跨中部位作为模拟的位移观测点,绘制纵筋收起模型荷载-位移曲线如图 2 所示。由图 2 可知:①弹性阶段预制板各部位位移随荷载的增加呈正比例增长;②弹塑性工作阶段带裂缝工作,随着受力不断增大,其肋部首先出现裂缝,荷载进一步增大时,纯弯段形成主裂缝,跨中位移显著增大,荷载与位移呈非线性增长,构件刚度随之下降,最终位移全面增大,荷载-位移曲线演化趋缓;③屈服后破坏阶段,随着荷载增加,构件达到极限承载力时,构件变形急剧增大,荷载明显降低,曲线呈向下趋势,构件破坏。

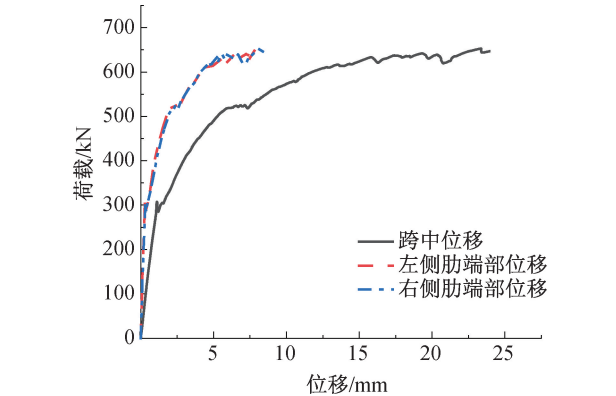


图 2 底部加劲肋收起模型荷载-位移曲线
Fig. 2 Load-displacement curve of longitudinal reinforcement retraction model

同样选取左、右侧肋端部及跨中部位作为模拟的位移观测点,绘制纵筋直通模型荷载-位移曲线如图 3 所示。由图 3 可知,曲线同样分为弹性阶段、弹塑性带裂缝工作阶段、屈服后破坏阶段 3 个阶段。对比图 2,3 可知,底部加劲肋收起模型在达到峰值荷载前对应的位移均大于纵筋直通模型。数值模拟结果对比如表 1 所示。

表 1 数值模拟结果对比

Table 1 Comparison of numerical simulation results				
模型	峰值荷载/kN	跨中位移/mm	左侧肋端部/mm	右侧肋端部/mm
底部加劲肋收起模型	645	23.9	8.25	8.38
底部加劲肋直通模型	605	22.5	6.76	8.32

由表 1 可知,有限元模拟结果表明,肋部直通式的极限承载力为 605kN,比肋部收起式的低 40kN;肋部直通式的跨中挠度为 22.5mm,比肋部收起式的小 1.4mm;且直通肋端变形更小。这说明肋部直通式虽极限承载力略有下降,但端部局部刚度提升,改善了局部变形与应力集中问题,受力性能具

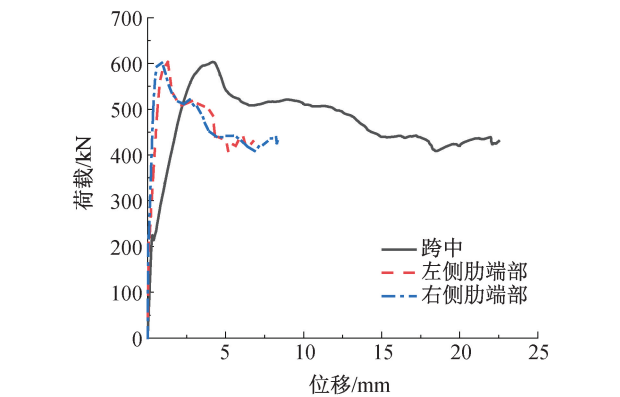


图 3 底部加劲肋直通模型荷载-位移曲线
Fig. 3 Load-displacement curve of longitudinal reinforcement straight model

有较好的合理性。

2.2 纵筋应变分析

有限元软件可较好地模拟和呈现出试验中各构件的破坏状态,为后期类似受弯构件的应变研究提供依据。为研究 2 个模型纵筋部位的应变,从而更好地分析静荷载试验下构件纵筋的破坏过程,提取 2 个模型的纵筋应变云图进行分析,如图 4 所示。由图 4 可知,纵筋在通长状态下所受的最大应力为 476MPa,在肋部收起作用下纵筋的最大应力为 496MPa,说明肋部通长构造可有效降低纵筋的峰值应力,使内力沿纵筋分布更均匀,避免应力集中;不管肋部是否通长,1/4 跨部位的纵筋应变始终最大。

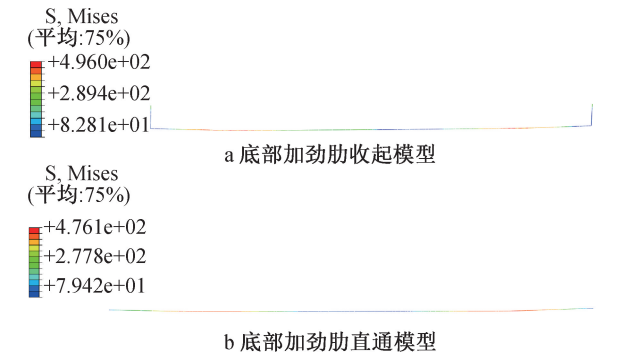


图 4 带肋叠合板纵筋应力云图(单位:MPa)
Fig. 4 Stress cloud map of longitudinal reinforcement of ribbed composite slab(unit: MPa)

2.3 加载过程中纵筋各部位应力发展规律

通过分析带肋叠合板纵筋各部位应力随荷载的变化,可推断出构件受弯状态下的薄弱部位。取底部纵筋一半进行数值模拟分析,并将其平均划分为 25 个单元,提取相应节点数据,按 4 个阶段绘制出纵筋各部位应变关系曲线,如图 5,6 所示。

由图 5,6 可知,2 种叠合板肋部模型所体现的纵筋应变规律相似。加载初期纵筋各部位受力均

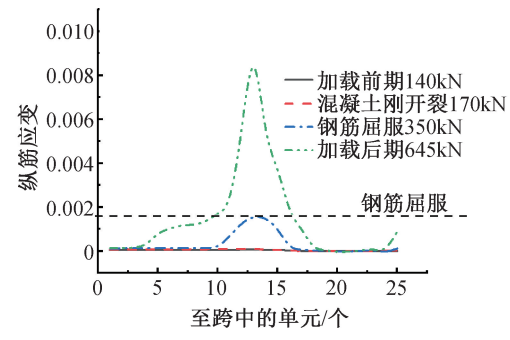


图 5 底部加劲肋收起模型应变曲线

Fig. 5 Strain curve of longitudinal reinforcement retraction model

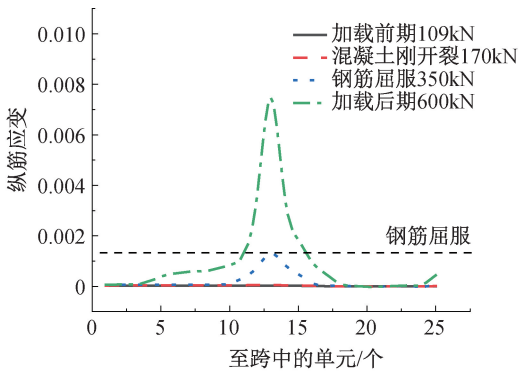


图 6 底部加劲肋直通模型应变曲线

Fig. 6 Strain curve of longitudinal reinforcement straight model

匀,应变值不大;进入加载中期,叠合板加劲肋底部混凝土出现初始开裂,此时局部拉力转移为由纵筋主要承担,跨中纵筋应变开始明显增大,从跨中向两侧纵筋应变相比较加载初期开始增大但不明显,直至钢筋屈服;试件模型破坏状态的模拟结果表明,底部加劲肋直通型叠合板的纵筋应变及变形整体略小于端部加劲肋收起型叠合板;对于端部加劲肋收起叠合板模型,端部纵筋弯起部分在加载初期应变不明显,进入加载后期,局部应变开始增加,但直至加载破坏,端部弯起纵筋并未屈服。

3 结语

- 1) 2 种类型叠合板模拟过程中,受力破坏过程符合适筋梁受力破坏过程,可分为弹性阶段、弹塑性带裂缝工作阶段、屈服后破坏阶段 3 个阶段。
- 2) 数值模拟分析结果表明,底部加劲肋直通型叠合板底部纵筋受力相对更均匀,2 种类型的叠合板底部纵筋在 1/4 跨部位的应变相对较大。
- 3) 进入受力阶段,相比较底部加劲肋直通型叠合板,端部加劲肋收起叠合板底部纵筋在 1/4 跨趋近区域应变略显偏大。

参考文献:

[1] 刘翔. 钢-预制带肋混凝土叠合板组合梁抗弯性能理论分析 [D]. 济南: 山东大学, 2017.
LIU X. Theoretical analysis of composite beams with cast-in-place concrete slabs on precast prestressed concrete decks [D]. Jinan: Shandong University, 2017.

[2] 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 J G, JIANG Y X, NIE X, et al. Effect of truss reinforcement on mechanical properties of prefabricated slabs [J]. Journal of building structures, 2021, 42 (1): 151-158.

[3] 陈科. 大跨度 PK 预应力混凝土叠合板的试验研究与理论分析 [D]. 长沙: 湖南大学, 2009.
CHEN K. Experimental study and theoretical analysis of large-span PK prestressed concrete composite slab [D]. Changsha: Hunan University, 2009.

[4] 孟宪宏, 沙连凯, 佟林, 等. 预应力带肋板与叠合板抗弯性能试验 [J]. 沈阳建筑大学学报 (自然科学版), 2017, 33 (1): 77-85.
MENG X H, SHA L K, TONG L, et al. Experimental research on flexural performance of prestressed ribbed slab and composite slab [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (natural science), 2017, 33 (1): 77-85.

[5] 王庆华, 樊则森, 孙占琦, 等. 预应力带肋叠合板力学性能试验研究 [J]. 施工技术, 2020, 49 (8): 9-12.
WANG Q H, FAN Z S, SUN Z Q, et al. Experimental research on mechanical properties of prestressed ribbed composite slabs [J]. Construction technology, 2020, 49 (8): 9-12.

[6] 倪东阳. 带肋钢筋混凝土叠合板的有限元分析及优化设计 [D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2019.
NI D Y. Finite element analysis and optimization design of reinforced concrete laminated slab with ribs [D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science & Technology, 2019.

[7] 王强, 朱丽丽, 李哲, 等. 用于 ABAQUS 显式分析梁单元的钢筋本构模型研究 [J]. 土木工程学报, 2013 (S2): 100-105.
WANG Q, ZHU L L, LI Z, et al. Study on constitutive model of reinforcement for ABAQUS explicit analysis of beam element [J]. China civil engineering journal, 2013 (S2): 100-105.

[8] 高欣, 吴晓伟, 田俊. 轻骨料混凝土剪力墙非线性有限元模型的构成及影响其抗震性能的因素 [J]. 吉林大学学报 (工学版), 2015, 45 (5): 1428-1435.
GAO X, WU X W, TIAN J. Structure of nonlinear finite element model of lightweight aggregate concrete shear wall and the factors affecting seismic performance [J]. Journal of Jilin University (engineering and technology edition), 2015, 45 (5): 1428-1435.

[9] 叶钰蓉, 饶超敏, 朱元臣, 等. 端板支承式多肋预制底板承载力试验研究 [J]. 宁波大学学报 (理工版), 2024, 37 (2): 48-56.
YE Y R, RAO C M, ZHU Y C, et al. Experimental study on bearing capacity of end-plate-supporting multi-ribbed composite concrete plate [J]. Journal of Ningbo University (natural science & engineering edition), 2024, 37 (2): 48-56.