

基于薄膜效应的混杂纤维轻骨料混凝土梁极限承载力试验

潘建军¹, 陈万祥^{1,2,3}, 周新军¹, 彭晓丽¹

(1. 陆军工程大学爆炸冲击防灾减灾全国重点实验室, 南京 210007; 2. 中山大学土木工程学院, 广东 珠海 519082;
3. 隧道工程灾变防控与智能建养全国重点实验室, 广州 510275)

摘 要: 薄膜效应对极限承载力的增强机制已形成共识, 但尚缺乏定量分析的方法。为模拟实际工程中梁式结构的薄膜效应, 设计制作了一套考虑水平刚度与转动刚度的支座约束装置。采用四点弯曲加载方式对 10 根混杂纤维轻骨料混凝土(HFR-LWC)梁进行了静力加载试验, 分析了约束条件、配筋率及有无纤维对 HFR-LWC 梁极限承载力的贡献, 得到了 HFR-LWC 梁跨中应变、裂缝分布及极限承载力变化规律, 量化分析了水平刚度和转动刚度对薄膜效应的影响, 结果表明: 极限抗力对支座转动刚度的变化更为敏感; 考虑薄膜作用的 HFR-LWC 梁极限承载力较普通支座 LWC 梁提高 1.5~5.5 倍, 特殊端部约束下梁的中和轴下移且加载时上升缓慢, 混凝土受压区高度增加; 混杂纤维提高了梁的韧性, 裂缝开展细且密, 有利于薄膜效应的发挥。

关键词: 薄膜效应; 轻骨料混凝土; 混杂纤维; 静力加载试验; 极限承载力

中图分类号: TU375.1 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2026)05-1727-13

网络出版时间: 2025-09-26



随着日益严峻的自然资源匮乏, 节能减排与成本控制已成为工程领域关注的焦点。轻骨料混凝土(LWC)因其在工程实际中具有大幅减小结构自重与尺寸、降低地基基础与材料运输费用、节约原料提高使用面积等优势, 在土木工程中被广泛应用^[1]。工程应用表明, 若考虑端部约束对结构承载力的影响, 构件截面可以进一步优化, 达到提高强重比的目的。中国对于端部特殊约束的试验研究起步较晚, 实际应用中对于小变形的结构基本都是简化为简支或固支支座进行计算^[2], 这种方法虽然减少了计算量, 但对构件抗力缺乏理解, 往往低估结构承载力, 故考虑支座约束作用对结构构件承载力的贡献具有现实意义^[3]。

中国内外学者就端部约束对结构极限抗力及破坏模式的影响进行了大量研究^[4-17]。以美国 and 原苏联为代表, A.Агвоздев 首次系统性地提出了在结构设计中考虑端部约束作用的理论框架, 并针对双向板楼盖体系进行了深入研究, 指出可通过适当降低中间跨板配筋率(建议值为 20%)的方式, 以合理考虑端部约束对结构承载力提升的有利影响。这一研

究成果为后续相关规范的制订提供了重要的理论依据。Ockleston^[18-19]在板格试验中发现由侧向约束产生的薄膜效应使得极限承载力比理论结果大 2 倍。

Gamble 等^[20]同样在小比例的钢筋混凝土板试验中发现极限承载力相当于理论值的 2 倍, 且破坏挠度约为板厚的 2 倍。Criswell^[21]发现由于支承墙的约束作用使均布荷载作用下的无梁楼板承载力比理论值大 30%。原苏联对冲击荷载作用下梁的受力性能展开了研究, 在试验中为探讨端部约束的影响, 在梁的两端设计了带有拉杆的抗推支座, 该试验方法的创新为后来有关端部约束的研究打下了基础。在中国, 李国强等^[22-23]研究分析了受火后考虑薄膜效应的压型钢板组合楼板极限承载力, 建立模型给出了计算公式, 但没有考虑板的受压薄膜效应。宋春明等^[24]采用数值模拟方法研究了柔性边界约束梁在动载作用下的弹塑性动力响应。陈万祥等^[25-27]研究了粘弹性支座 RC 梁在爆炸与低速冲击荷载作用下的动力响应, 分析了支座刚度与支座阻尼对破坏模式的影响规律。陈力等^[28-30]考虑了水平约束分别对弹性与

收稿日期: 2025-05-27。 修订日期: 2025-06-17。

基金项目: 国家自然科学基金(52378548); 江苏省自然科学基金(BK20221530)。

第一作者: 潘建军(1994—), 男, 博士研究生。

通信作者: 陈万祥(1977—), 男, 博士, 副教授。

Received date: 2025-05-27. Revised date: 2025-06-17.

First author: PAN Jianjun (1994—), male, Doctoral candidate.

E-mail: pj425750443@163.com

Correspondent author: CHEN Wanxiang (1977—), male, Ph.D., Associate Professor.

E-mail: cwx_0806@sohu.com

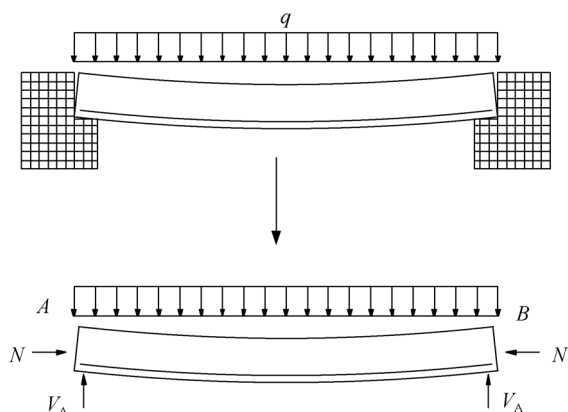
塑性阶段的影响,推导了钢筋混凝土梁板静力与爆炸作用下的极限抗力方程,但忽视了转动约束的影响。

本工作设计了一套新型支座约束装置,旨在定量揭示端部约束对梁式构件极限抗力的贡献,通过可控约束调节机制,模拟真实工程约束条件,通过对 10 根混杂纤维轻骨料混凝土(HFR-LWC)梁(3 根简支对比、7 根带约束)进行四点抗弯试验,系统分析支座约束作用对破坏模式和极限承载力的影响,为优化设计提供可靠数据支持。考虑支座约束作用对结构承载力的影响为工程实践提供了一种经济高效的优化途径,使设计人员能够更精准地利用材料强度,提升结构性能,同时降低建造成本,具有重要的理论价值和工程应用前景。

1 薄膜效应原理

在工程实际中,大部分梁板式构件的端部支承并非理想的简支或固支支座,实际上是带有一定刚度的弱连结构。

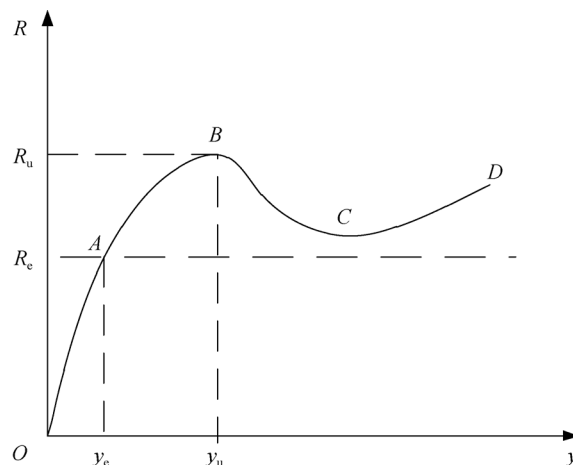
如图 1 所示,钢筋混凝土梁在均布荷载作用下,发生弯曲变形,由于支座的约束,使下部变形受到抑制,在梁中产生纵向压力 N ; 由于此力集中于梁的受拉区,该偏心压力有效约束了梁的弯曲变形且梁端部将产生有利于提高梁承载力的弯矩 M 。 N 和 M 的共同作用导致结构构件抗力随着变形而变化,分为 3 个阶段(图 2): 1) 受压产生弯曲变形上升段 OB ; 2) 混凝土开裂剥落下降段 BC ; 3) 钢筋拉伸变形上升段 CD 。这种特殊端部约束力被称为薄膜效应^[31]。分析时,可将其简化为考虑边界支承水平与转动刚度耦合作用的特殊支座,如图 3 所示。



q is uniformly distributed load. N is horizontal restraining force. V_A is vertical restraining force.

图 1 梁式构件弯曲变形示意图

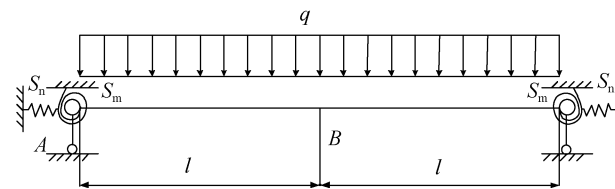
Fig. 1 Schematic diagram for bending deformation of beam-like member



R_u is ultimate resistance. R_e is yield resistance. y_u is midspan deflection at ultimate load. y_e is midspan deflection at yield.

图 2 梁式构件抗力变化示意图

Fig. 2 Schematic diagram for the change in resistance of beam-like member



S_n is horizontal stiffness. S_m is rotational stiffness.

图 3 梁式构件弯曲变形计算简图

Fig. 3 Simplified calculation diagram for bending deformation of beam-like member

2 实验

2.1 材料性能

实验选用具有广阔使用前景的 HFR-LWC 作为研究对象。根据 JGJ/T 12—2019《轻骨料混凝土应用技术标准》^[32], 采用 520 kg/m³ 的 P·O20 普通硅酸盐水泥、900 级高强页岩陶粒轻粗骨料进行材料制备, 并在混凝土中加入硅灰掺合料提高强度, 加入塑钢纤维和聚丙烯纤维^[33–34]提高混凝土韧性。通过调整水胶比与减水剂用量以确保拌合物的流动性, 确定最终配合比见表 1。

分别制作 3 块尺寸为 100 mm×100 mm×100 mm 的 LWC 和 HFR-LWC 立方块试块, 经过 28 d 养护后利用 SBK-3A 电热鼓风干燥箱, 在设定温度 105 ℃ 的条件下持续烘干 3.5 h, 试块质量达到恒重后进行密度测量(表 2)。根据 JGJ/T 12—2019《轻骨料混凝土应用技术标准》^[32] 有关规定, 本工作所制备的混凝土干表观密度均小于 1950 kg/m³, 均为轻骨料混凝土。

表 1 轻骨料混凝土配合比

Table 1 Mix proportion for lightweight aggregate concrete

Water-to-binder ratio	Volume fraction of sand/%	Cement/kg	Silica fume/kg	Coarse aggregate/kg	Sand/kg	Mass fraction of water reducer/%	Volume fraction of polypropylene fiber/%	Volume fraction of plastic steel fiber/%
0.35	0.3	520	52	711	512	2	0.1	0.4

表 2 混凝土试块干密度

Table 2 Density of concrete test blocks

Specimen number	Mass before drying/g	Mass after drying/g	Fiber addition	Average dry density/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
A31	1924	1915	Yes	1910
A33	1928	1920	Yes	1910
A35	1905	1894	Yes	1910
A21	1906	1867	No	1873
A22	1880	1896	No	1873
A23	1869	1857	No	1873

按照 GB/T 50081—2019《普通混凝土力学性能试验方法标准》^[35]，使用万测试验机分别对混凝土立方体试块进行力学性能测量，试块破坏形态如图 4 所示，得到 LWC 与 HFR-LWC 试块的抗压强度分别为 34.80 MPa 和 47.97 MPa，弹性模量分别为 30 GPa 和 33.5 GPa。



图 4 试块破坏状态

Fig. 4 Failure state of concrete test block

试验纵筋选用 $\phi 6$ 螺纹钢筋，支座拉杆选用 $\phi 20$ 的 316L 不锈钢拉杆，采用 WE-600B 万能材料试验机对梁钢筋和钢拉杆进行强度拉伸试验，RFP-9W 型智能测力仪采集数据，测量钢筋和拉杆强度见表 3。

表 3 钢筋和拉杆强度测量

Table 3 Tensile strength test results for reinforcing steel and tie rods

Material	Diameter/mm	Yield force/kN	Ultimate force/kN	Yield strength/MPa	Ultimate strength/MPa
Reinforcing bar	5.5	21.97	26.69	653.0	793.21
Tie rod	20	155.86	201.49*	496.11	641.36

*The tie rod failed at the threaded ends.

2.2 试件制作

为研究混凝土延性与配筋率对约束效应的影响，试验制作了 10 根尺寸为 200 mm×100 mm×1500 mm 的 HFR-LWC 模型梁，配筋率分别为 0.42%(图 5a)与 0.28%(图 5b)。试验梁纵筋采用 $\phi 6$ 螺纹钢筋上下对称配置，箍筋采用 $\phi 6@100$ mm 光圆钢筋，保护层厚度 10 mm，具体配筋如图 6 所示。

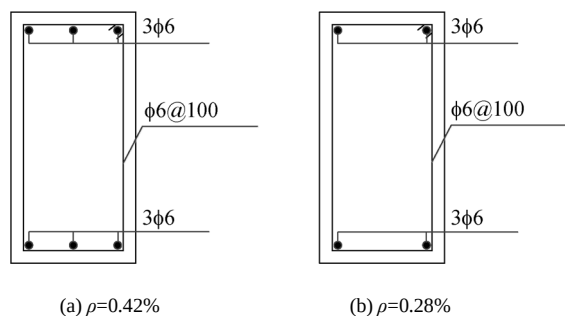
(a) $\rho=0.42\%$ (b) $\rho=0.28\%$

图 5 HFR-LWC 模型梁

Fig. 5 HFR-LWC model beam

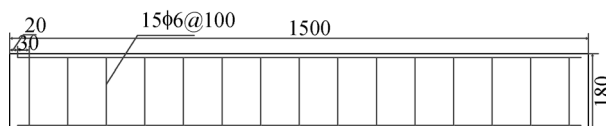


图 6 箍筋布置图

Fig. 6 Stirrup arrangement drawing

2.3 支座设计

在进行结构计算时，通常将支座简化为简支支座。该方法在结构仅为小变形时可以减少计算难度，但当结构发生较大变形时，由于支座的约束作用，在结构中面产生的压(拉)力 N 和弯矩 M 作用，限制了结构的伸长与转动，故导致最终构件的极限承载力大于设计值。为考虑支座水平约束与转动约束对梁极限承载力的影响，区别于以往大量采用的理想约束薄板，设计制作了带拉杆的钢支座对试验梁进行约束，以拉杆位置与数量控制约束力大小，如图 7a 所示。拉杆设计为等间距对称分布，详细尺寸如图 7b 所示。制作材料为 $\phi 20 \times 1800$ 的 316L 不锈

钢，屈服强度为 496.11 MPa，通过拉杆限制梁的伸长变形产生薄膜效应。

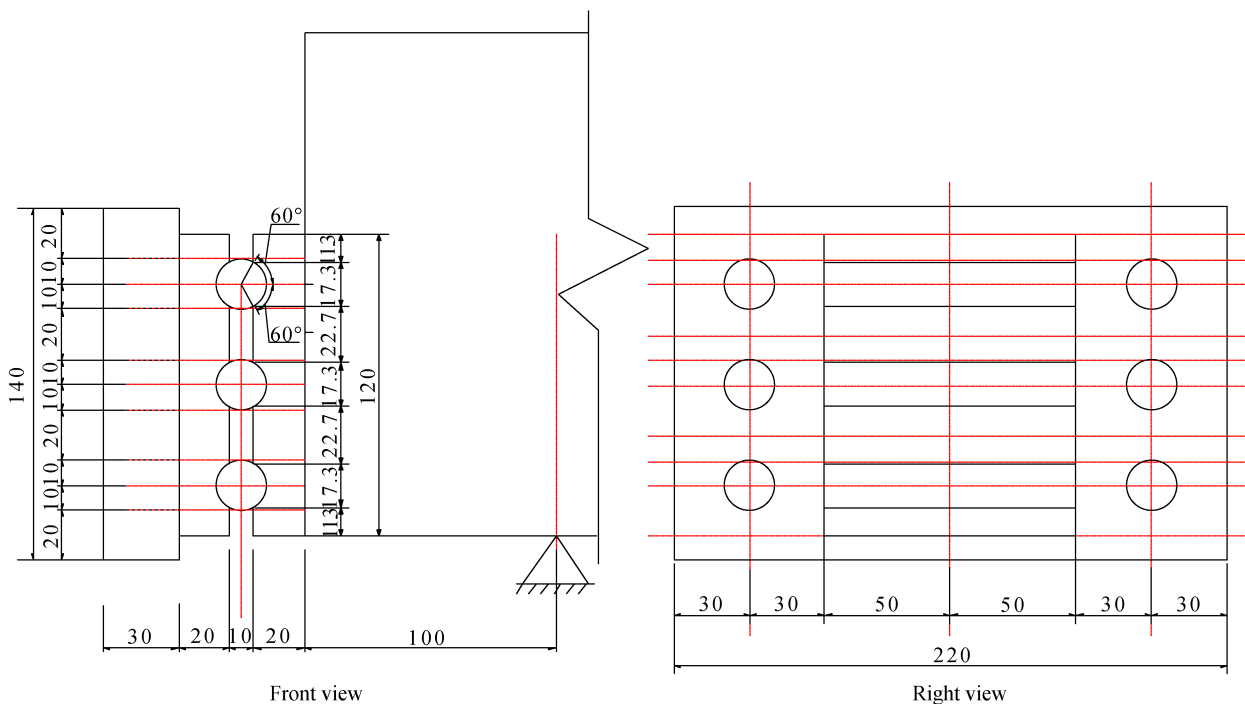
2.4 加载方案

使用液压手摇千斤顶采用四点弯曲试验装置对模型梁施加集中荷载，如图 8 所示。沿梁纵向等间距布置 5 个位移计，梁跨中等间距布置 5 个应变片，梁端底部与梁端中部各布置 1 个应变片，实验开始前需先进行预加载，确保加载装置稳定和仪表工作正常。

通过分级加载方式进行试验，先对 3 根简支梁进行弯曲试验，初步了解梁开裂荷载与极限承载力后，确定加载步长。剩余 7 根梁进行带拉杆的弯曲试验，通过调整拉杆改变支座约束。试验过程中，混凝土开裂前每级加载稳定 10 min，每 2 min 采集一次数据，当加载接近开裂荷载时，缩短为 1/2 荷载步长继续加载，当梁临近破坏时，减缓加载速度，混凝土破坏后每 30 s 采集一次下降段数据。



(a) Physical object image



(b) Detailed dimensions (mm)

图 7 附带拉杆的钢支座
Fig. 7 Steel support with pull rod

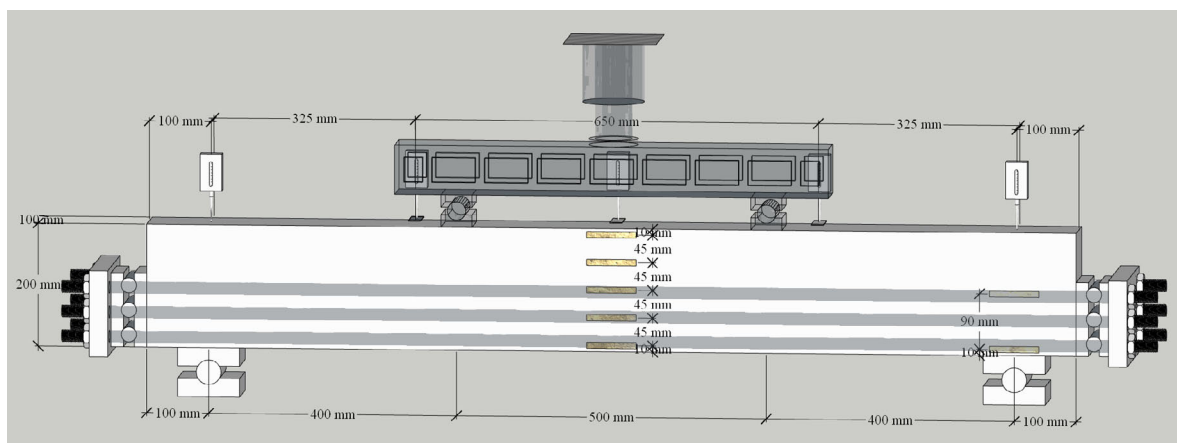


图 8 加载装置示意图

Fig. 8 Schematic diagram of loading device

3 结果与讨论

3.1 结果

试验荷载与各测点位移分别采用 GGD-331 型峰值测力仪与 DH3816 静态应变测试系统采集，具

体数值汇总于表 4 中。

3.2 极限承载力影响因素分析

结合试验工况，将试验梁进行分组，分析约束条件、配筋率及有无纤维等单因素对承载力的影响。

表 4 实验结果

Table 4 Experimental results

Beam ID	Fiber addition	Reinforcement ratio/%	Rod combinations	Theoretical ultimate load q_{th} /kN	Experimental ultimate load q /kN	Peak deflection f /mm	Relative peak deflection f/h
A22	No	0.28	None	34.6	31.7	18.3	0.092
A23	No	0.28	①	34.6	184.0	14.5	0.073
A24	No	0.28	①③	34.6	128.0	7.4	0.037
A53	Yes	0.28	①	34.7	168.0	7.8(7.2)	0.039(0.036)
A61	Yes	0.42	③	51.9	194.0	9.2(7.9)	0.046(0.040)
A62	Yes	0.42	None	51.9	51.0	22.0	0.117
A63	Yes	0.28	None	36.7	36.2	28.8	0.144
A64	Yes	0.28	③	36.7	64.0	10.7	0.054
A66	Yes	0.28	③	36.7	103.0	7.6	0.038
A67	Yes	0.28	①③	36.7	124.0	17.3	0.087

q_{th} is the theoretical ultimate load for a beam without end restraints. For beams A53 and A61, the mid-span displacement (measured by gauge W3, shown in parentheses) did not reach its maximum value when the peak load was attained.

3.2.1 约束条件 选择 A63、A53、A66、A64、A67 作为不同约束条件对比对象，如图 9 所示。可以发现拉杆的存在极大提高了梁的极限承载力，且拉杆数量与位置的变化对于梁的极限承载力影响很大。

当梁发生弯曲时，上部受压缩短下部受拉伸长，且两端相对转动，拉杆的存在抑制了梁的变形，提高了承载力，也减小了相对荷载峰值挠度。其中无拉杆工况梁 A63 极限承载力与理论极限承载力^[36]

基本一致，梁 A64、A66、A53 均为 1 根拉杆但位置不同，最终测得 3 种工况极限承载力大小分别为 A63 工况的 1.77、2.85、4.64 倍。3 种工况的原点曲线斜率逐渐增大，且峰值荷载挠度减小，逐渐趋于脆性破坏，这一现象说明拉杆越远离梁的中和轴，对于极限承载力的提高效果越明显，但延性变形能力逐渐变弱。这是因为当弯曲变形时，梁下端是受拉区，越远离中和轴将产生的受拉变形越大，所以靠近下端的拉杆抑制梁变形的能力更强。同时还发

现, 梁 A67 作为含有①③号 2 根拉杆的混凝土梁, 与含有③号拉杆的梁 A64 相比承载力增大, 但与含有①号拉杆的梁 A53 相比承载力减小。分析可知, 由于③号拉杆的存在, 使得更加远离中和轴的①号拉杆在提高承载力的作用中占比减少, 弱化了拉杆限制变形的能力, 使边界约束强度降低, 故梁 A67 相较于梁 A53 承载力较小但延性变形能力更强, 相对峰值荷载挠度较大。

综上所述, 根据试验结果, 拉杆数量和位置的变化使梁的极限承载力增大了 1.5~5.5 倍, 具体提升范围如下: 仅③号拉杆作用下提升约 1.5~2.0 倍; 仅②号拉杆作用下提升约 2.0~3.0 倍; ①③号拉杆共同作用下提升约 3.0~4.0 倍; 仅①号拉杆作用下提升约 4.0~5.5 倍。

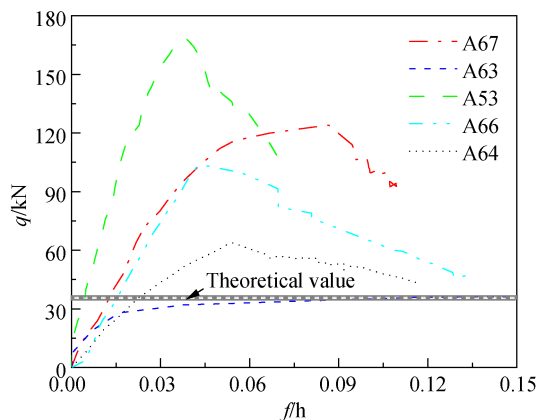


图 9 不同拉杆约束梁荷载-挠度曲线

Fig. 9 Load-deflection curves of restrained beams with different tie bars

3.2.2 配筋率 研究考虑薄膜效应的不同配筋率对极限承载力的影响, 因此选择 A61、A67 为不同配筋率对比对象。为统一比较, 避免因配筋率差别造成承载力不同, 本工作采用试验承载力与理论承载力的比值 q/q_{th} 作为衡量标准, 比值越大, 即承载力增幅越大, 说明在薄膜效应的影响下极限承载力大小对配筋率变化越敏感。如图 10 所示, 在受力变形前期同一挠度下的高配筋梁 A61 与低配筋梁 A67 相比承载力增幅较大, 此时梁 A61 承载力主要应由混凝土抗压强度、钢筋抗拉强度、钢筋混凝土黏结力与支座约束装置产生的薄膜效应耦合作用组成, 且相较于梁 A67 钢筋抗拉强度的作用占比较大。随着梁变形挠度的发展, 由支座约束装置产生的薄膜效应贡献逐渐增大, 试验梁表现出更强的承载能力, 当梁 A61 达到峰值荷载挠度时, 受压区混凝土压碎, 承载力下降。但梁 A67 由于其低配筋率表现出更好

的延性, 峰值荷载挠度为梁 A61 的 2.2 倍。由于薄膜效应的影响, 高配筋梁 A61 的相对极限承载力仅为低配筋梁 A67 的 1.11 倍, 由理论分析得知, 当配筋率在一定范围内时, 配筋率与承载力增幅成反比, 也即配筋率越低, 端部约束作用下极限承载力提高越明显。

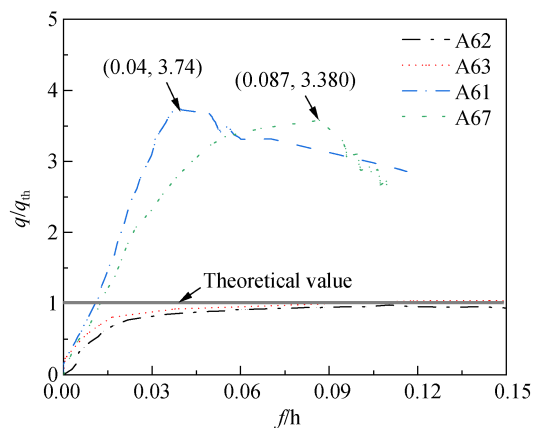


图 10 试件 A61、A67 荷载-挠度曲线

Fig. 10 Load-deflection curves of A61 and A67

3.2.3 有无纤维 选择 A23、A53; A24、A67 分别作为不同拉杆条件下有无纤维影响因素对比对象。由于有无纤维对于混凝土强度与梁的极限承载力影响较大, 采用试验承载力与理论承载力的比值 q/q_{th} 作为衡量标准。对比结果如图 11 所示, 分别为含①号拉杆梁之间对比与含①③号拉杆梁之间对比。梁 A23 和 A24 在达到极限荷载后呈现显著的荷载骤降现象, 表现出典型的脆性破坏特征。相比之下, 梁 A53 和 A67 由于在混凝土制备过程中掺入了纤维材料, 其力学性能得到显著改善。当构件达到开裂荷载后, 纤维材料有效参与

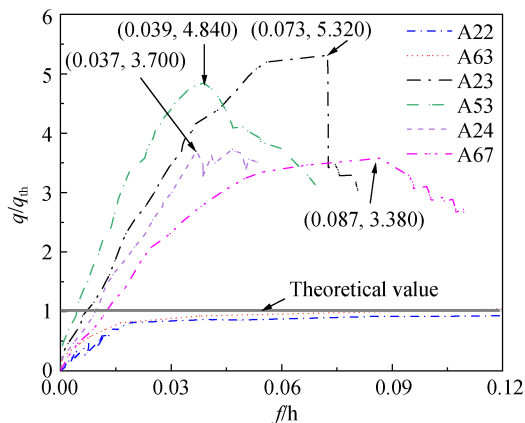


图 11 试件 A23、A53、A24、A67 荷载-挠度曲线

Fig. 11 Load-deflection curves of A23, A53, A24, and A67

了裂缝扩展过程,从而改善了构件的变形性能,其荷载-位移曲线呈现出相对平滑的下降段。这一现象表明,纤维的加入显著提高了混凝土梁的延性性能,使其破坏模式由脆性破坏转变为具有一定延性的破坏模式。但有无纤维对于相对极限承载力影响不大。

分别对比分析梁 A23、A53 与梁 A24、A67,可以看出有无纤维对于考虑薄膜效应的梁的极限承载力影响并不大。由于可能存在的加载速度差异或

试件制备缺陷等不可控因素的影响,无纤维梁 A23 的极限承载力高于有纤维梁 A53,该情况虽不具备代表性,但仍可看出,在薄膜效应的影响下纤维并非决定承载力大小的关键性因素。

3.3 端部约束作用的构件变形

为了解随荷载增加混凝土变形情况,使用 DH3616 静态应变仪测得各测点混凝土应变,如图 12 为 10 根 LWC 梁应变-挠度曲线。

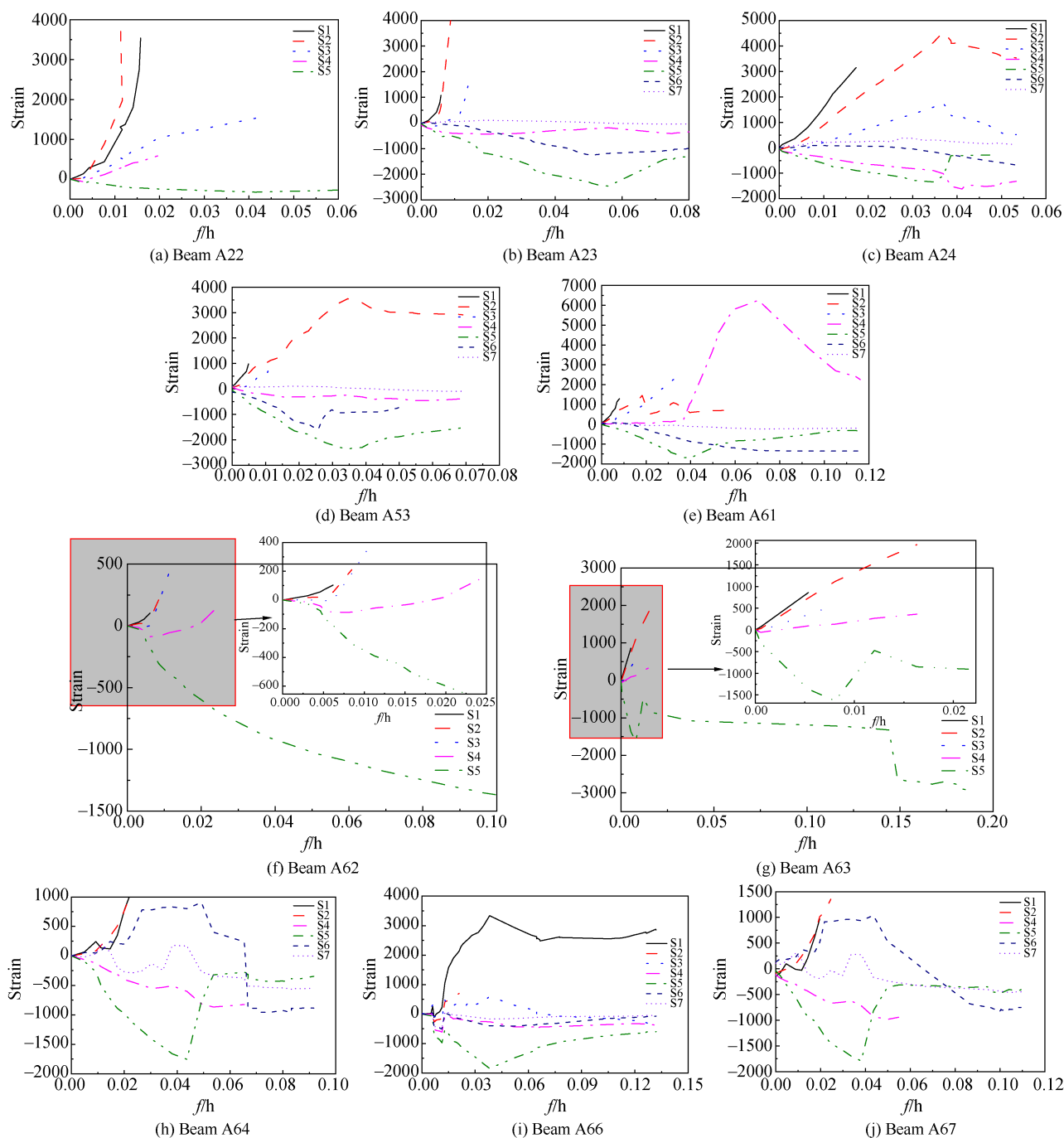


图 12 混凝土应变-挠度曲线
Fig. 12 Variations of concrete strain-deflection

可以看出, 试验初期梁跨中底部就已出现裂缝, 多数试件的应变片 S1~S3 很快退出工作, 且由于混凝土抗拉承载力远远小于抗压承载力, 最终测得最大拉应变均大于压应变。根据试验记录的梁开裂过程中, 各时段各测点的应变变化, 选取具有代表性的梁 A22、A62、A63、A67, 量化沿截面高度的应变分布, 如图 13 所示, 发现对于没有拉杆约束的梁 A22、A62、A63, 配筋率较大的梁 A62, 开裂时受压区高度增大, 而在相同配筋率条件下, 含纤维的

梁 A63, 开裂时受压区高度较大。该现象说明钢筋与纤维可以有效约束混凝土的变形, 限制裂缝的开展。对比梁 A63、A67, 发现拉杆约束有效地控制了中和轴上移, 充分发挥了混凝土的抗压特性, 使其破坏模式发生变化。而分析各梁的跨中应变, 发现 3 根无拉杆约束梁的受压区应变在梁破坏后其压应变数值仍不断增加, 7 根有拉杆约束梁的受压区应变在梁破坏后其压应变数值陡然下降, 这一现象同样印证了拉杆约束对梁破坏模式的影响。

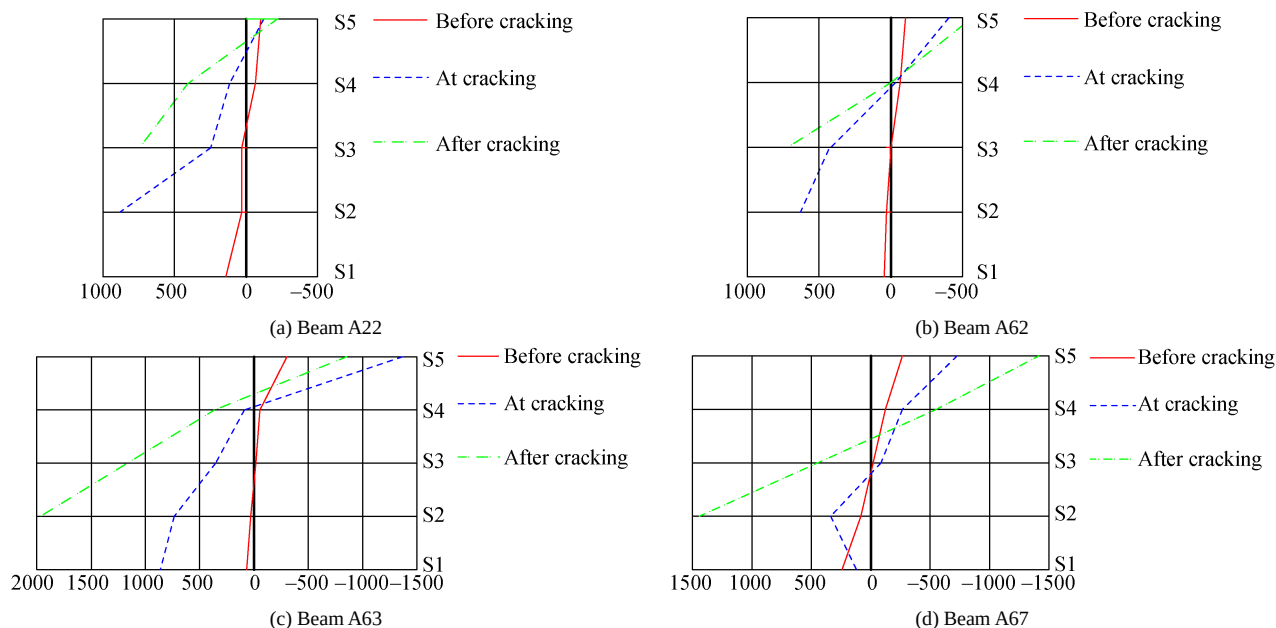


图 13 梁 A22、A62、A63、A67 跨中截面应变

Fig. 13 Strain at the mid-span section of beam A22, A62, A63, A67

试验过程中, 梁的初始裂缝出现在分配梁垫块下方附近, 而梁端两垫块之间属于纯弯段, 随着不断加载, 纯弯段不断产生新裂缝, 并不断向上端受压区延伸, 且裂缝宽度不断扩展, 直至形成贯穿裂缝而破坏, 如图 14a、图 14b 所示。观察各试件裂缝开展情况发现, 梁 A22、A62、A63 由于未安装支座约束装置, 其破坏特征与适筋梁相似。梁 A24、A64、A66 破坏过程中有部分斜裂缝发展, 属于弯剪破坏。梁 A23、A53、A61、A67 前期出现弯曲裂缝, 之后突然出现腹剪斜裂缝, 且伴随尖锐响声, 说明随着荷载增加试件由弯剪破坏向剪压破坏转变。各类工况梁构件破坏模式, 如图 14c~图 14e 所示。表 5 为具体各梁裂缝开展情况, 从表 5 中可知: 1) 随着支座约束的增强, 开裂所需荷载越大, 且越容易发生斜截面剪压破坏; 2) 配筋率越高, 开裂荷载越大; 3) 在端部约束的作用下, 纤维在一定程度上增强了梁的承载力, 影响裂缝的开展, 使产生的裂缝细且密。

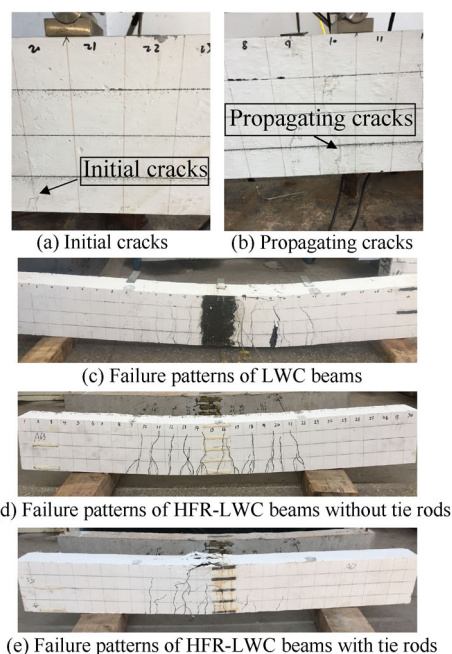


图 14 各工况的裂缝情况

Fig. 14 Crack situation under various working conditions

表 5 各工况裂缝开展情况
Table 5 Crack propagation in various conditions

Beam ID	Flexural cracks	Diagonal shear cracks	Experimental cracking load q/kN	Experimental ultimate load q/kN	$\frac{q'}{q}$
A22	12	0	17	31.7	0.54
A23	10	2	32	184.0	0.17
A24	8	0	24	128.0	0.19
A53	12	2	40	168.0	0.24
A61	13	2	36	194.0	0.19
A62	13	0	24	51.0	0.47
A63	13	0	16	36.2	0.44
A64	9	0	24	64.0	0.38
A66	11	0	28	103.0	0.27
A67	10	1	32	124.0	0.26

3.4 薄膜效应的量化分析

根据平截面假定，认为构件的平面横截面，在变形后仍保持平面，如图 15 所示。

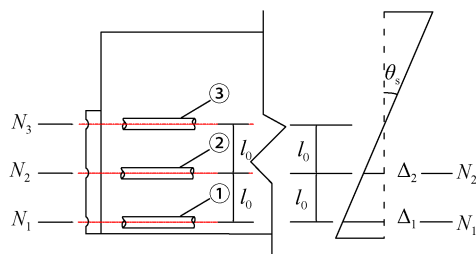


图 15 支座刚度计算简图

Fig. 15 Schematic diagram for the calculation of support stiffness

可知支座约束力分别为

$$N = N_1 + N_2 + N_3 \quad (1)$$

$$M = l_0 (N_2 + 2N_1) \quad (2)$$

由式(1)和式(2)可得各支座约束条件下的转动刚度和水平刚度(表 6)。

表 6 边界约束刚度
Table 6 The stiffness of boundary constraints

Beam ID	Horizontal stiffness S_n	Rotational stiffness S_m	Peak load ratio q/q_{th}	Relative peak deflection f/h
A22	0	0	0.92	0.092
A23	$2AE_s/l$	$4AE_sl_0^2/l$	5.32	0.073
A24	$4AE_s/l$	$3.32AE_sl_0^2/l$	3.70	0.037
A53	$2AE_s/l$	$4AE_sl_0^2/l$	4.84	0.039
A61	$4AE_s/l$	$3.32AE_sl_0^2/l$	3.74	0.046
A62	0	0	0.98	0.117
A63	0	0	0.99	0.144
A64	$2AE_s/l$	0	1.74	0.054
A66	$2AE_s/l$	$2AE_sl_0^2/l$	2.81	0.038
A67	$4AE_s/l$	$3.32AE_sl_0^2/l$	3.38	0.087

E_s is the elastic modulus of the steel tie rod. A is the cross-sectional area of the steel tie rod. l is the length of the half-span beam. l_0 is the center-to-center distance between the tie rods.

梁 A53、A66、A64 仅支座约束不同，其水平刚度同为 $2AE_s/l$ ，转动刚度分别为 $4AE_sl_0^2/l$ 、 $2AE_sl_0^2/l$ 、0，相对极限荷载分别为 4.84、2.81、1.74，相对峰值挠度分别为 0.039、0.038、0.054。这说明转动刚度提高了梁的极限承载力，减小了对应的峰值荷载挠度。对比梁 A23、A24 与梁 A53、A67 难不发现，梁 A23、A53 的转动刚度是梁 A24、A67 的 1.20 倍，而水平刚度只有 0.5 倍，相对极限荷载却分别增大了 1.44 倍和 1.43 倍，这一现象说明薄膜效应对支座转动刚度的变化更为敏感。

对比③号杆与①③号杆的边界约束刚度可知，由于③号杆的存在，梁端部的转动约束显著减弱，导致梁的极限承载力降低。为量化分析③号杆对梁极限承载力的影响，表 7 分别计算了在支座约束条件为①③号杆时，梁 A24、A61 及 A67 的拉力分布情况。

表 7 ①③拉杆拉力分布

Table 7 Distribution of tensile force in tie rods ① and ③

Beam ID	N_3/kN	N_1/kN	$\frac{N_3}{N_1 + N_3} / \%$
A24	26.8	130.0	17.1
A61	41.1	238.8	14.7
A67	40.0	169.2	19.1

从表 7 可以看出，拉杆③的平均拉力约占总拉力的 17%。理想地认为，当拉杆变形相同时，拉杆所产生的拉力应相同。结合以上分析，当拉杆③存在时，导致拉杆①的拉力平均降低了 17%，使支座的转动刚度减弱。针对这种现象，本工作对梁 A24、A61、A67 的转动刚度进行折减，系数为 0.83。

梁变形过程中产生的拉杆力随挠度增长而不断增长，对 7 根带拉杆的轻骨料混凝土梁拉杆力的增长趋势进行量化分析，如图 16 所示。

薄膜效应受水平刚度与转动刚度耦合影响，其影响随变形进程动态变化，不能片面的通过拉杆力和挠度大小判断。通过观察不难发现，在达到峰值挠度前拉杆力随挠度增长，其峰值滞后于极限承载力峰值，且边界约束越强，曲线斜率越大。如梁 A64，仅有水平刚度，无转动刚度，薄膜效应对挠度的增长变化不敏感，表现为曲线斜率最小；而梁 A53，有水平刚度及最大转动刚度，边界约束较强，薄膜效应对挠度的增长变化较为敏感，表现为曲线斜率最大。

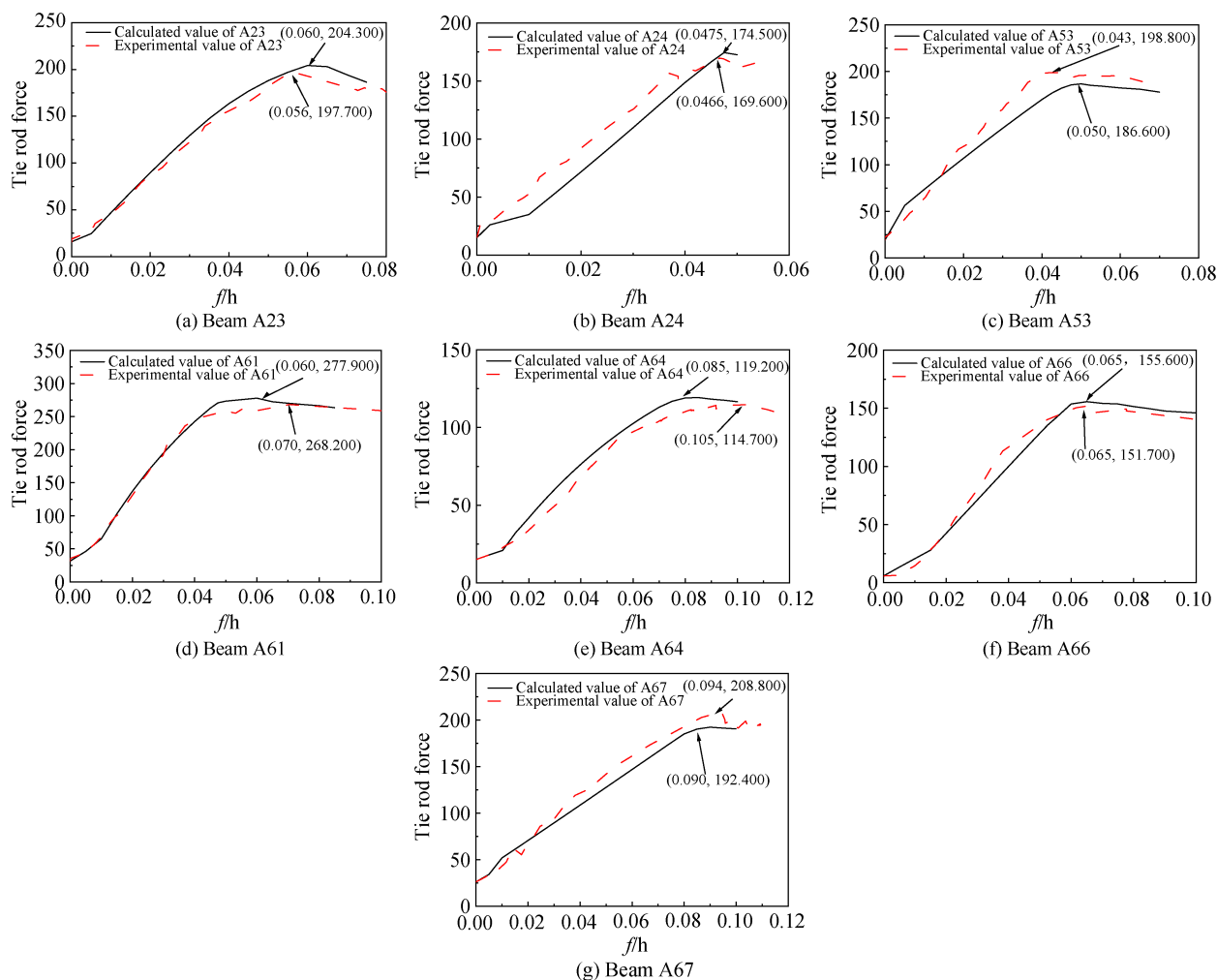


图 16 梁 A23、A24、A53、A61、A64、A66、A67 拉杆力-挠度曲线

Fig. 16 Force-deflection curve of the tie rod in beam A23, A24, A53, A61, A64, A66, A67

4 结论

本工作对考虑薄膜效应的 10 根 LWC 梁进行了四点弯曲试验, 得到应变-挠度曲线与面内拉力-位移曲线。主要结论如下:

1) 区别于传统支座的简化方法, 研究设计了一套考虑水平刚度与转动刚度的支座约束装置, 反映了端部约束对钢筋混凝土构件极限承载力的影响。试验结果表明, 该约束条件下的梁体主要呈现弯剪破坏模式: 在加载初期以弯曲变形为主, 随着荷载持续增加, 破坏模式逐渐向斜截面剪压破坏转变, 且在支座约束较强的构件中, 这种破坏特征表现得尤为显著。该研究成果为工程实践提供了更符合实际受力状态的试验依据。

2) 利用控制装置拉杆位置和数量的方法, 改变支座约束刚度, 发现由于薄膜效应的存在致使梁的极限承载力提高 1.5~5.5 倍, 且有效地控制了裂缝的

扩展, 延缓了中和轴上移。

3) 薄膜效应受水平刚度与转动刚度耦合影响, 并随构件变形而渐进发展。对比①号拉杆与①③号拉杆对极限承载力的贡献, 其转动刚度提高 20%, 极限承载力分别增长 44%与 43%, 且在水平刚度降低 50%的情况下, 转动刚度的微小变化仍主导了承载力提升, 说明薄膜效应对转动刚度的变化更为敏感。

4) 分析了端部约束作用下各因素对构件性能影响发现: 支座约束越强, 梁极限承载力越大, 中和轴附近的拉杆会降低约束的转动刚度, 提高结构的变形性能; 低配筋率的梁对于端部约束更加敏感; 塑钢纤维混杂聚丙烯纤维有效改善了混凝土的开裂性能, 使裂缝分布更趋均匀, 充分发挥了混凝土抗压不抗拉的材料特性。

参考文献:

[1] 龚洛书. 积极研究与开发高性能轻集料混凝土[J]. 混凝土, 1999(3):

- 8–12.
GONG Luoshu. Concrete, 1999(3): 8–12.
- [2] 龙驭球, 包世华, 匡文起, 等. 结构力学: 基本教程[M]. 3版. 北京: 高等教育出版社, 2012.
- [3] 钱七虎, 王明洋. 高等防护结构计算理论[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 2009: 242–254.
- [4] ZHANG D S, DONG Y L, WU Y P. Calculation of tensile membrane effect of one-way concrete slabs[J]. J Jilin Univ Eng Technol Ed, 2013, 43(5): 1253–1257.
- [5] WANG G, WANG Q X, LIU S R. Calculation method of load capacity compressive membrane effect of reinforced concrete slab[J]. J Jilin Univ Eng Technol Ed, 2010, 40(3): 699–704.
- [6] WANG G, SI B J, KANG H G. Deflection calculation of reinforced concrete slab under compressive membrane action[J]. J Basic Sci Eng, 2017, 25(4): 751–759.
- [7] WANG G, WANG Q X, LI Z J, et al. Experimental investigation of membrane action in reinforced concrete slab in shear-wall structures[J]. J Dalian Univ Technol, 2012, 52(1): 66–73.
- [8] DONG Y L. Calculation of tensile membrane effects of concrete slabs using deformation additive decomposition theorem[J]. Chin J Theor Appl Mech, 2010, 42(6): 1180–1187.
- [9] WANG Y, DONG Y L, YUAN G L, et al. Load-carrying capacity analysis of reinforced concrete two-way slabs considering membrane effect[J]. J Huazhong Univ Sci Technol Nat Sci Ed, 2014, 42(3): 96–101.
- [10] GUO Q, WANG S, ZHOU S J. Mechanical performance of completely GFRP-tendon-reinforced concrete slabs considering compressive-tensile membrane action[J]. Eng Struct, 2024, 321: 118944.
- [11] THIENPONT T, VAN COILE R, DE CORTE W, et al. Capacity and failure modes of restrained hollow core slabs taking into account compressive membrane action[J]. Struct Concr, 2023, 24(5): 5732–5749.
- [12] THARMARAJAH G, TAYLOR S, ROBINSON D. Experimental and numerical investigation of compressive membrane action in GFRP-reinforced concrete slabs[J]. Polymers, 2023, 15(5): 1230.
- [13] CUI L L, ZHANG X H, HAO H. Experimental investigation of resistance function of RC beam considering membrane effects[J]. Eng Struct, 2022, 267: 114602.
- [14] 王勇, 王姗姗, 严宝峰, 等. 不同梁柱约束下混凝土楼盖火灾后承载力试验及理论研究[J/OL]. 工程力学, 2024: 1–16. (2024–11–25). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2595.o3.20241125.1435.004.html>.
WANG Yong, WANG Shanshan, YAN Baofeng, et al. Eng Mech, 2024: 1–16. (2024–11–25). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2595.o3.20241125.1435.004.html>.
- [15] 陈万祥, 郭志昆, 罗立胜, 等. 考虑面力效应的 HFR-LWC 梁抗爆理论模型与试验验证[J]. 工程力学, 2021, 38(2): 77–91.
CHEN Wanxiang, GUO Zhikun, LUO Lisheng, et al. Eng Mech, 2021, 38(2): 77–91.
- [16] 王勇, 姜亚强, 李凌志, 等. 考虑薄膜效应区域的混凝土双向板承载力计算[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2021, 49(1): 93–98.
WANG Yong, JIANG Yaqiang, LI Lingzhi, et al. J Huazhong Univ Sci Technol Nat Sci Ed, 2021, 49(1): 93–98.
- [17] 雷宇霜, 金浏, 杜修力. 结构空间约束对钢筋混凝土梁受弯性能的影响[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2024, 54(4): 885–893.
LEI Yushuang, JIN Liu, DU Xiuli. J Southeast Univ Nat Sci Ed, 2024, 54(4): 885–893.
- [18] OCKLESTON A J. Load tests on a 3-storey RC building in Johannesburg[J]. Struct Eng, 1955, 33: 322.
- [19] OCKLESTON A J. Arching action in reinforced concrete slabs[J]. Struct Eng, 1958, 34: 304.
- [20] GAMBLE W L, SOZEN M A, SIESS C P. Tests of a two-way reinforced concrete floor slab[J]. J Struct Div, 1969, 95(6): 1073–1096.
- [21] CRISWELL M E. Design and testing of a blast-resistant reinforced concrete slab system[R]. US Army Engineer Waterways Experiment Station, 1972.
- [22] 李国强, 周昊圣, 郭士雄. 火灾下钢结构建筑楼板的薄膜效应机理及理论模型[J]. 建筑结构学报, 2007, 28(5): 40–47.
LI Guoqiang, ZHOU Haosheng, GUO Shixiong. J Build Struct, 2007, 28(5): 40–47.
- [23] 李国强, 郭士雄, 周昊圣. 火灾下钢结构建筑楼板的薄膜效应模型验证及实用方法[J]. 建筑结构学报, 2007, 28(5): 48–53.
LI Guoqiang, GUO Shixiong, ZHOU Haosheng. J Build Struct, 2007, 28(5): 48–53.
- [24] 宋春明, 王明洋, 王德荣. 柔性动边界梁的弹塑性动力响应分析[J]. 工程力学, 2008, 25(12): 42–47.
SONG Chunming, WANG Mingyang, WANG Derong. Eng Mech, 2008, 25(12): 42–47.
- [25] 陈万祥, 郭志昆, 叶均华. 爆炸荷载作用下柔性边界钢筋混凝土梁的动力响应与破坏模式分析[J]. 兵工学报, 2011, 32(10): 1271–1277.
CHEN Wanxiang, GUO Zhikun, YE Junhua. Acta Armamentarii, 2011, 32(10): 1271–1277.
- [26] 陈万祥, 郭志昆. 粘弹性支座 RC 梁在低速冲击下的动力响应计算[J]. 工程力学, 2010, 27(5): 115–121.
CHEN Wanxiang, GUO Zhikun. Eng Mech, 2010, 27(5): 115–121.
- [27] 陈万祥, 郭志昆. 粘弹性支座 RC 梁在低速冲击下的弹性响应分析[J]. 工程力学, 2010, 27(2): 186–192.
CHEN Wanxiang, GUO Zhikun. Eng Mech, 2010, 27(2): 186–192.
- [28] 陈力, 方秦, 龚自明, 等. 静载作用下钢筋混凝土梁板结构的面力效应(I): 理论模型[J]. 土木工程学报, 2011, 44(1): 29–35.
CHEN Li, FANG Qin, GONG Ziming, et al. China Civ Eng J, 2011, 44(1): 29–35.
- [29] 陈力, 方秦, 还毅, 等. 爆炸荷载作用下钢筋混凝土梁板结构的面力效应[J]. 工程力学, 2010, 27(8): 156–163.
CHEN Li, FANG Qin, HUAN Yi, et al. Eng Mech, 2010, 27(8): 156–163.
- [30] CHEN L, FANG Q, GUO Z K, et al. An improved analytical method for restrained rc structures subjected to static and dynamic loads[J]. Int J Str Stab Dyn, 2014, 14(1): 1350052.
- [31] KRAUTHAMMER T, KRAUTHAMMER T. Modern Protective Structures[M]. Boca Raton: CRC Press, 2008. <https://doi.org/10.1201/9781420015423>
- [32] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ/T 12—2019 轻骨料混凝土应用技术标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- [33] 向晓峰. 高强轻骨料混凝土的配制及其纤维改性试验研究[D]. 中国人民解放军理工大学, 2005.
XIANG Xiaofeng. Experimental Study on Compound of High Strength Lightweight Aggregate Concrete and its Fiber Modification[D]. PLA University of Science and Technology, 2005.

- [34] 王丹, 郭志昆, 陈万祥, 等. 混杂纤维轻骨料混凝土性能试验研究[J]. 建筑结构, 2014, 44(14): 21–23.
WANG Dan, GUO Zhikun, CHEN Wanxiang, et al. Build Struct, 2014, 44(14): 21–23.
- [35] 中国建筑科学研究院. GB/T 50081—2019 混凝土物理力学性能试验方法标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
- [36] 成松松, 陈万祥, 郭志昆, 等. 考虑面力效应的端约束轻骨料混凝土梁受弯性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(12): 56–65.

CHENG Songsong, CHEN Wanxiang, GUO Zhikun, et al. J Build Struct, 2018, 39(12): 56–65.

作者贡献声明:

潘建军: 开展试验研究及数据分析、绘制图表、撰写论文初稿
陈万祥: 提出计算理论、设计论文框架、修改论文
周新军: 参与试验研究和数据处理
彭晓丽: 论文保密审查

Ultimate Bearing Capacities of Hybrid Fiber Reinforced Lightweight Aggregate Concrete Beam with Membrane Effect

PAN Jianjun¹, CHEN Wanxiang^{1,2,3}, ZHOU Xinjun¹, PENG Xiaoli¹

(1. State Key Laboratory of Disaster Prevention & Mitigation of Explosion & Impact, Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, China; 2. School of Civil Engineering, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, Guangdong, China; 3. State Key Laboratory for Tunnel Engineering, Guangzhou 510275, China)

Extended Abstract

Introduction Lightweight aggregate concrete (LWC) offers some advantages like low density, thermal insulation, heat resistance, fire resistance, and excellent seismic performance. The incorporation of hybrid fibers further enhances its toughness, durability, and crack resistance, resulting in a composite material known as hybrid fiber reinforced-lightweight aggregate concrete (HFR-LWC). In protective engineering, deformations induce a "membrane effect" at the end restraints of structures, altering their ultimate resistance and failure modes. Conventional load-bearing components are often simplified as simply supported or fixed in mechanical analyses, neglecting the influence of the membrane effect. This leads to conservative designs for ultimate bearing capacity, preventing the full utilization of component strength. Therefore, investigating the membrane effect's contribution to improving component bearing capacity is of significant importance. This paper was to design and fabricate a set of support restraint devices for horizontal stiffness and rotational stiffness to simulate the membrane effect in beam structures. Four-point bending tests were conducted on ten HFR-LWC beams under static loading. The contributions of restraint conditions, reinforcement ratios, and the presence of fibers to the ultimate bearing capacity of HFR-LWC beams were analyzed. The variation patterns of mid-span strain, crack distribution, and ultimate bearing capacity of the HFR-LWC beams were examined. In addition, the influences of horizontal stiffness and rotational stiffness on the membrane effect were also quantitatively analyzed.

Methods Based on the Technical Specification for Lightweight Aggregate Concrete (JGJ/T 12—2019), this study developed a hybrid fiber reinforced lightweight aggregate concrete (HFR-LWC) with high strength, low density, and good workability through multiple mix proportion trials. Ten concrete beams with the dimensions of 200 mm×100 mm×1500 mm were cast, featuring a symmetrical reinforcement with A6 deformed longitudinal bars and A6@100 plain stirrups at different reinforcement ratios (*i.e.*, ρ of 0.42% and ρ of 0.28%). After 28-d curing under identical conditions, the compressive strength and elastic modulus of concrete specimens were tested according to the standard GB/T 50081—2019 by a universal testing machine. A specialized support restraint device was designed and fabricated to account for both horizontal and rotational stiffness. The experimental program included three simply supported beams and seven boundary-restrained beams tested under four-point static bending. Five displacement transducers were evenly spaced along the beam span to measure deformation patterns under various load levels and record the deflection at ultimate load. Five strain gauges were installed at mid-span to monitor neutral axis variations and strain distribution under different support conditions and deflection levels. Additional strain gauges were placed at beam ends and mid-span to analyze strain variations caused under different restraint conditions. Through the quantitative analysis of experimental data, this research systematically investigated the influences of support constraint, reinforcement ratio and fiber incorporation on the membrane effects. The findings could elucidate the mechanisms by which these factors affected the ultimate load-bearing capacity of HFR-LWC beams, providing valuable insights for the structural design.

Results and discussion Based on the experimental conditions, the test beams are grouped to investigate the influences of restraint condition, reinforcement ratio and fiber incorporation on the load-bearing capacity. The analysis of test groups under different restraint conditions reveals that the presence of tie rods significantly enhances the ultimate load-bearing capacity of the beams, and variations in both the number and position of tie rods have substantial effects on this capacity. The comparative analysis of test groups at different reinforcement ratios demonstrates that for membrane effects within a certain range of reinforcement ratios, there exists an inverse relationship between reinforcement ratio and the increase in load-bearing capacity. Specifically, a lower reinforcement ratio

results in more pronounced improvements in ultimate load-bearing capacity under end restraints. The examination of test groups with and without fiber incorporation shows that fiber materials effectively participate in the crack propagation process and improve the deformation performance of the members. The analysis of strain and crack development in the test beams indicates that the mechanism by which membrane effects affect a load-bearing capacity primarily involves restricting concrete cracking and crack propagation, thereby increasing ultimate capacity, while simultaneously reducing structural deformation performance. The relationship between tie rod force and deflection shows a synchronous variation with beam load-bearing capacity. In the initial deformation stage, these two parameters exhibit the similar results. However, the tie rod force surpasses the peak load-bearing capacity of the beam, with its maximum value occurring later than that of the beam's capacity as the deflection increases.

Conclusions Unlike conventional calculation methods that could simplify supports, the influence of end restraints on the ultimate bearing capacity of reinforced concrete members could reflect actual engineering conditions. The membrane effect increased the ultimate bearing capacity of beams by approximately 1.5 times to 5.5 times and effectively controlled the crack propagation. Compared to the influence of horizontal stiffness on the ultimate bearing capacity, the membrane effect showed a greater sensitivity to variations in rotational stiffness. The hybrid fibers could significantly improve the cracking performance of concrete, resulting in a more uniform crack distribution, which could facilitate the development of membrane effects.

Keywords membrane effect; lightweight aggregate reinforced concrete; hybrid fiber; static loading; ultimate bearing capacity