

# 不同剪跨比下陶粒混凝土叠浇梁抗剪性能试验研究

汪一鸣, 刘安庆, 桑琴扬, 王建民\*

(宁波大学 建筑工程与环境学院, 浙江 宁波 315211)

**摘要:** 简支梁受压区采用普通混凝土, 受拉区采用陶粒混凝土, 可充分利用普通混凝土的高抗压强度及陶粒混凝土良好延性及自重轻的优点, 实现二者有机结合. 通过设计制作3根底部采用陶粒混凝土, 上部采用普通混凝土, 剪跨比分别为1.3、1.9、2.5的叠浇梁, 和1根剪跨比为1.9的全陶粒混凝土梁进行抗剪性能试验, 分析叠浇梁在荷载作用下的整体工作性能与破坏特征, 研究不同剪跨比对叠浇梁抗剪极限承载力、变形、最大斜裂缝宽度、纵筋应变和箍筋应变的影响. 结果表明: 所设计的叠浇梁叠浇结合面整体工作性能良好; 随着剪跨比的增大, 跨中挠度和最大斜裂缝宽度增大; 达到极限荷载时, 纵筋均未屈服, 剪跨区箍筋屈服, 4根简支梁均发生典型的剪切破坏.

**关键词:** 叠浇梁; 陶粒混凝土; 抗剪性能; 剪跨比

**中图分类号:** TU502

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1001-5132 (2017) 05-0058-06

随着建筑结构不断朝高耸、大跨、重载方向发展, 普通混凝土自重大的缺点日益明显, 严重限制了其在结构中的应用. 轻骨料混凝土具有密度小, 强度高的优点, 能够有效减轻结构自重<sup>[1]</sup>. 另外, 随着建筑工业化的促进与发展, 叠合构件因具有高效工业化、施工机械化、节省模板、降低造价、文明施工和保护环境等优点, 在实际工程应用愈加广泛<sup>[2]</sup>. 对于梁构件来说, 主要承受压力作用仅为梁上部混凝土, 如果将构件非受压区部分混凝土替换为轻骨料混凝土, 则可有效减轻构件自重, 在高层建筑和大跨度建筑中更加发挥其轻质高强的优点<sup>[3]</sup>. 两种不同材料混凝土叠浇而成的简支梁, 梁的力学性能及其能否共同作为一个整体工作是叠浇梁的关键<sup>[4]</sup>. 国内外学者对再生混凝土与普通混凝土叠合梁进行大量试验研究, 而对陶粒混凝土与普通混凝土叠浇梁的抗剪性能研究尚属空白.

本文通过设计制作下部受拉区用陶粒混凝土, 上部受压区用普通混凝土的叠浇梁构件, 对陶粒混凝土叠浇梁抗剪性能进行荷载试验, 研究不同剪跨比下叠浇梁极限承载力、挠度变化、最大斜裂

缝宽度、纵筋应变和箍筋应变的变化情况及破坏形态, 分析叠浇梁的整体工作性能及其可行性.

## 1 试验概况

### 1.1 试验材料

陶粒混凝土、普通混凝土粗骨料分别为椭圆型高强陶粒和普通碎石; 采用P·O 42.5普通硅酸盐水泥; 细骨料为中砂, 堆积密度为 $1450 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ; 粉煤灰. 按照表1配合比进行制作. 在陶粒混凝土中掺入聚丙烯腈纤维, 掺入量为 $1 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , 参数见表2.

表1 混凝土配合比  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$

| 类别    | 水泥  | 粗骨料      | 沙子  | 粉煤灰 | 水     |
|-------|-----|----------|-----|-----|-------|
| 普通混凝土 | 460 | 1180(石子) | 580 | 80  | 165.6 |
| 陶粒混凝土 | 400 | 660(陶粒)  | 540 | 80  | 192.0 |

表2 PANF 纤维规格参数

| 项目                                   | 数据范围       | 项目                | 数据范围  |
|--------------------------------------|------------|-------------------|-------|
| 密度/( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) | 1.15~1.20  | 长度/mm             | 15~20 |
| 抗拉强度/MPa                             | $\geq 450$ | 断裂伸长率/%           | 10~40 |
| 杨氏模量/GPa                             | $\geq 5$   | 直径/ $\mu\text{m}$ | 10~25 |

收稿日期: 2017-03-27.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 宁波大学学科项目(XKL14D2074); 宁波大学教研项目(801504522).

第一作者: 汪一鸣(1992-), 男, 安徽黄山人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 混凝土结构. E-mail: 18892626845@163.com

\*通信作者: 王建民(1974-), 男, 山西运城人, 副教授, 主要研究方向: 结构抗震与防灾减灾. E-mail: wangjianmin@nbu.edu.cn

1.2 试件设计与制作

试验共设计制作 4 根简支梁构件: 1 根为全陶粒混凝土梁; 3 根为陶粒混凝土与普通混凝土叠浇梁. 梁对比情况见表 3.

表 3 叠浇梁构件

| 梁描述    | 编号    | 剪跨/mm | 剪跨比 $\lambda$ |
|--------|-------|-------|---------------|
| 陶粒混凝土梁 | L-1.9 | 494   | 1.9           |
| 叠浇梁    | D-1.3 | 338   | 1.3           |
| 叠浇梁    | D-1.9 | 494   | 1.9           |
| 叠浇梁    | D-2.5 | 650   | 2.5           |

叠浇梁上部普通混凝土主要承受压力作用, 下部陶粒混凝土主要承受拉力作用, 下部陶粒混凝土的抗压强度对其影响不大. 又考虑到 2 种不同材料混凝土叠浇梁工作的整体性, 设计上部普通混凝土强度为 C50, 底部陶粒混凝土强度为 LC30. 根据计算求得的叠浇梁相对受压区高度确定叠浇高度, 叠浇高度为 165 mm. 混凝土保护层厚度为 25 mm, 梁底纵向受拉钢筋为单排布置 3C25, 纵筋配筋率为  $\rho=2.78\%$ ; 架立筋采用 2B10; 箍筋配置为 A6@100. 叠浇梁尺寸及配筋见图 1, 应变片和位移计布置情况见图 2.

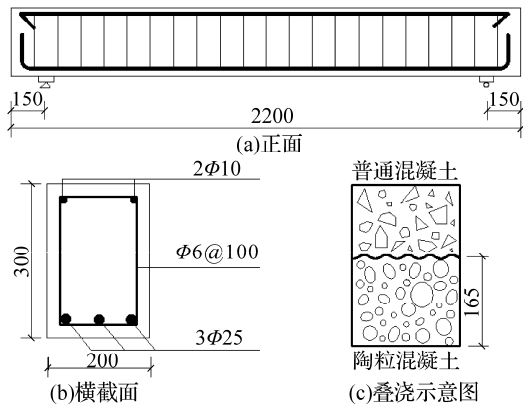


图 1 叠浇梁配筋示意图(单位: mm)

叠浇梁由两台搅拌机浇筑完成, 先浇筑底部陶粒混凝土部分, 后浇筑上部普通混凝土部分. 2 种混凝土叠浇间隔时间为 0.5 h. 叠浇普通混凝土前, 用细钢筋在叠浇结合面无规则刮动至凹凸状, 以增加两种混凝土叠合面咬合力<sup>[5]</sup>, 所制作的叠浇梁自重比全普通混凝土整浇梁要轻 15.13%, 同时预留 2 种混凝土试块, 与叠浇梁在相同条件下养护 28 d, 预留试块力学性能见表 4, 钢筋力学性能测试值见表 5.

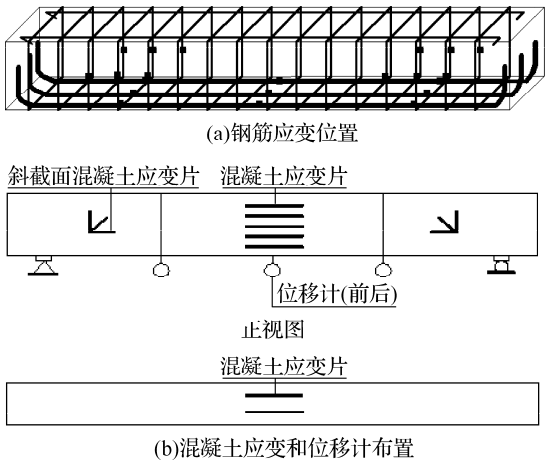


图 2 应变片位移计布置图

表 4 预留试件力学性能测试值

| 类别    | $f_{cu}/\text{MPa}$ | $f_{ck}/\text{MPa}$ | $f_t/\text{MPa}$ | $E_c/\text{MPa}$ | 容重/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$ |
|-------|---------------------|---------------------|------------------|------------------|-------------------------------------|
| 陶粒混凝土 | 36.2                | 32.0                | 3.2              | $2.55\times10^4$ | 1740                                |
| 普通混凝土 | 56.1                | 47.4                | 4.3              | $3.50\times10^4$ | 2400                                |

表 5 钢筋力学性能测试值

| 直径/mm | 屈服强度/MPa | 极限强度/MPa |
|-------|----------|----------|
| 6     | 424      | 656      |
| 10    | 531      | 663      |
| 25    | 468      | 594      |

1.3 加载及测试方案

按照混凝土结构试验方法标准<sup>[6]</sup>进行加载试验. 加载前, 在试件梁表面均匀涂抹一层薄白石灰, 以便加载过程中观测裂缝的发展, 使用 5 000 kN 四柱同步压力试验机和分配梁施加竖向荷载, 采用两点静力分级加载方式, 装置见图 3. 正式加载前先进行预加载, 正式加载按照到达计算的开裂荷载前每级 10 kN 加载, 出现初始裂缝后每级 20 kN 加载. 待加载稳定由静态应变测试采集系统自动采集数据, 记录 21 个钢筋应变片, 13 个混凝土应变片和 6 个位移计数值读数, 并用裂缝观测仪读取每级荷载下裂缝出现总数量和剪跨区主斜裂缝最大宽度, 整体分析不同剪跨比下梁的破坏过程.



图 3 加载图

## 2 试验过程现象及分析

### 2.1 试件破坏过程

#### (1) 陶粒混凝土梁( $\lambda=1.9$ )

加载至 70 kN, 梁底跨中位置开始出现第 1 条垂直裂缝; 荷载达到 160 kN 时, 跨中裂缝数量明显增多, 且裂缝突破纵筋处向上发展, 随后缓慢增长; 180 kN 时, 剪跨区在截面高度 70~220 mm 出现斜裂缝, 220 kN 斜裂缝由支座贯通至加载点; 荷载达到 516 kN, 剪跨区突然出现多条斜裂缝, 梁达到极限承载力, 剪跨区混凝土出现溃裂状, 斜裂缝端部混凝土剪压破坏。

#### (2) 叠浇梁( $\lambda=1.3$ )

荷载为 140 kN, 跨中出现竖直初裂缝; 荷载达到 180 kN, 剪跨区开始出现竖向裂缝; 荷载加至 360 kN, 左右两侧均突然出现由支座到加载点贯通主斜裂缝, 裂缝宽度为 0.15 mm, 随着荷载不断增加, 裂缝宽度缓慢增大; 荷载达到 771 kN 时, 发出“嘣”的一声, 叠浇梁达到极限承载力发生破坏, 其破坏与斜向受压短柱相似。

#### (3) 叠浇梁( $\lambda=1.9$ )

加载至 80 kN, 出现第 1 条垂直裂缝; 140 kN 竖向裂缝突然增多, 剪跨区出现细微斜裂缝; 荷载达到 180 kN, 斜裂缝发展至截面叠浇高度处, 之后缓慢上升; 荷载加至 582 kN, 裂缝宽度达到 1.5 mm, 斜截面在压应力和剪应力联合作用下发生破坏。

#### (4) 叠浇梁( $\lambda=2.5$ )

加载至 80 kN, 跨中出现第 1 条竖向裂缝; 100 kN 时, 剪跨区开始出现竖向裂缝; 220 kN 时, 斜裂缝由支座发展到截面叠浇高度处, 距离支座横向距离为 360 mm, 且斜裂缝出现横向延伸裂缝; 荷载为 400 kN 时, 斜裂缝宽度发展至 0.84 mm; 荷载加至 441 kN, 梁达到极限承载力, 发生破坏。

### 2.2 试件破坏形态

由图 4 可看出, 随着剪跨比的增大, 剪跨区斜裂缝分布由密到疏, 裂缝间距逐渐增大。对比相同剪跨比的梁 L-1.9 和 D-1.9, 全陶粒混凝土梁剪跨区斜裂缝数量较多较密, 且出现的裂缝总数量比叠浇梁多。这是因为普通混凝土弹性模量和抗拉强度较陶粒混凝土大, 在相同荷载作用下, 叠浇梁抵抗变形能力更强, 变形相对较小, 因而裂缝较疏。

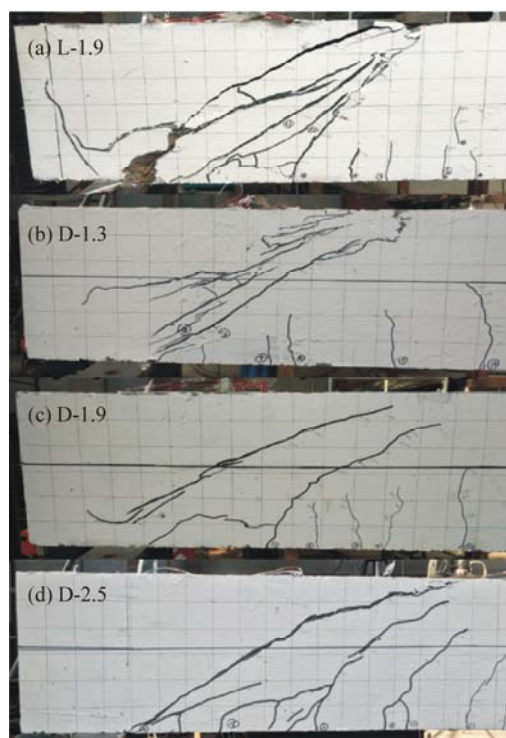


图 4 试件梁剪跨区破坏形态

## 3 试验结果及分析

### 3.1 荷载—挠度曲线分析

从叠浇梁荷载—挠度曲线(图 5)可以看出, 4 根

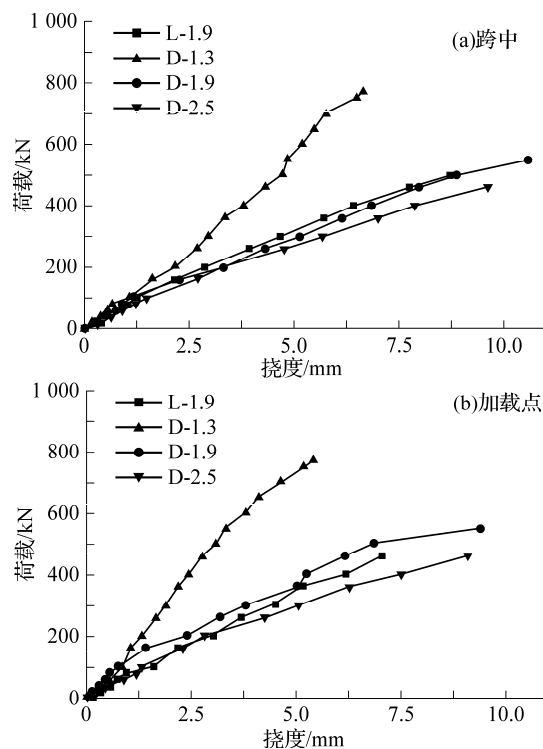


图 5 荷载—挠度曲线

梁构件的跨中挠度与加载点挠度变化规律相似, 跨中挠度发展比加载点处挠度发展要快. 同一级荷载作用下, 叠浇梁的挠度随着剪跨比的增大而增大, 400 kN 时剪跨比为 1.3, 1.9, 2.5, 3 根叠浇梁的跨中挠度分别达到 3.80、6.84、7.88 mm. 荷载值为极限荷载 85% 前, 4 根梁的挠度变化曲线接近于线性变化, 接近极限荷载时挠度增长变快. 对比同一剪跨比的叠浇梁和全陶粒混凝土, 荷载较小时, 全陶粒混凝土梁跨中挠度大于叠浇梁, 这是由于陶粒混凝土弹性模量较小, 相同荷载作用下压区混凝土变形量更大. 达到极限承载力时, L-1.9、D-1.3、D-1.9、D-2.5 的最终跨中挠度分别为 8.75、6.64、11.03 和 9.61 mm.

### 3.2 荷载—最大斜裂缝宽度曲线分析

对比图 6 中的 D-1.3、D-1.9、D-2.5 叠浇梁最大斜裂缝宽度可知, 同一荷载作用下, 随着剪跨比的增大, 最大斜裂缝宽度越大. 剪跨比为 D-1.3 的叠浇梁出现斜向裂缝荷载比其他梁大, 且前期裂缝宽度几乎不增长. 对比 L-1.9 与 D-1.9, 相同荷载作用下全陶粒混凝土梁裂缝宽度较大, 这是由于陶粒混凝土强度低, 裂缝发展也较快. 总体来说, 裂缝宽度前期变化缓慢, 随着荷载增大, 后期裂缝宽度变化较大. 4 根梁都未出现明显横向发展裂缝, 达到极限荷载时, 最大裂缝宽度都达到 1.5 mm.

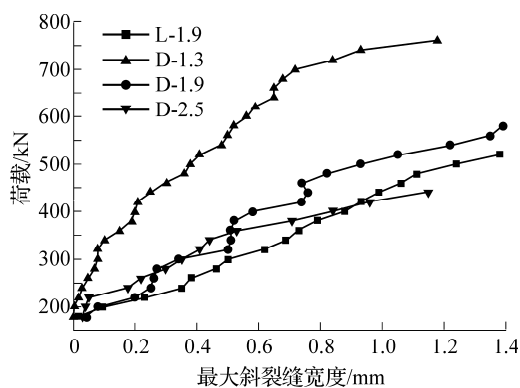


图6 荷载—最大斜裂缝宽度曲线

### 3.3 荷载—纵筋应变曲线分析

从图7中可以看出, 剪跨区纵筋应变与跨中纵筋应变变化规律相同, 荷载较小时, 纵筋应变较小且增长缓慢. 当叠浇梁跨中出现竖向裂缝时, 纵筋应变值开始增长较快. 荷载—纵筋应变曲线呈线性变化. 加载后期, 剪跨区纵筋应变值大于跨中纵

筋应变值. 这是由于当剪跨区出现明显斜裂缝, 靠近斜裂缝处的纵筋受力更大, 应变值更大. 达到极限荷载时, 构件梁的纵筋均未发生屈服.

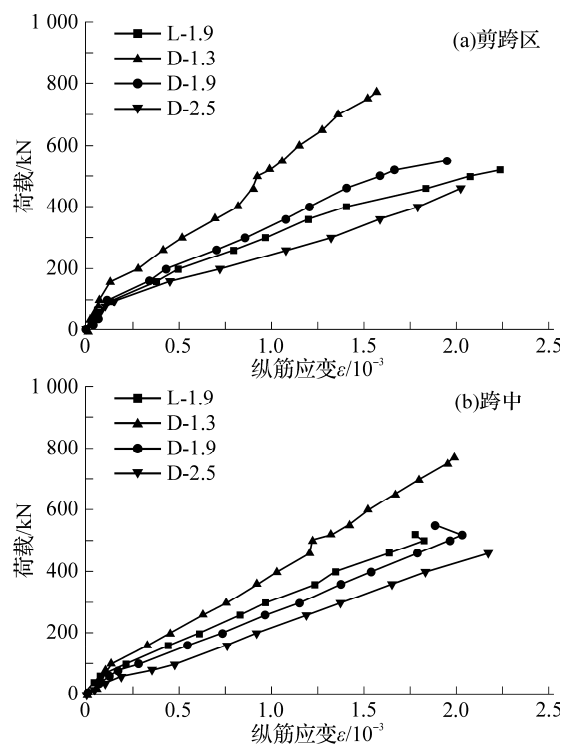


图7 荷载—纵筋应变曲线

### 3.4 荷载—剪跨区箍筋应变曲线分析

由图8可知, 荷载较小时, 箍筋几乎无明显应变, 前期部分应变出现微小负值, 这是由于纵筋配筋率较大, 梁整体形成桁架-拱模型, 加载初期, 纵筋有微小上弯, 导致箍筋受压, 应变为负值. 从箍筋应变来看, 说明前期主要由混凝土承担剪切力, 当荷载达到 200 kN 左右, 箍筋应变突然增大, 箍筋开始承担作用力, 这与剪跨区出现斜裂缝荷载值相吻合, 符合实际情况. 箍筋开始承担作用力

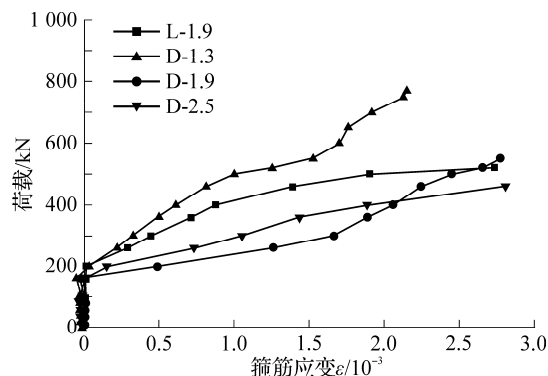


图8 荷载—剪跨区箍筋应变曲线

后到极限荷载 85%前, 随着荷载增大, 箍筋应变变化呈线性增长. 随着箍筋的屈服, 叠浇梁达到极限承载力.

### 3.5 荷载—跨中混凝土应变曲线分析

叠浇梁由两种不同材料特性的混凝土共同承担荷载作用, 叠浇结合面上两种混凝土工作是否满足协同性, 关乎叠浇梁的整体性和推广可行性. 图 9(a)为 D-2.5 梁在不同荷载阶段, 跨中沿截面等高度处混凝土应变, 荷载为 0~60 kN 之间, 截面 165 mm 高度处应变接近 0, 且上部压应变和下部拉应变数值绝对值相等, 符合平截面假设. 随着荷载的增大, 上部压应变数值绝对值增长比下部拉应变快, 分析其原因, 由于梁下部布置 3C25 的纵筋, 承担了梁截面下部部分拉应力, 这与荷载作用下纵筋应变逐渐增大相吻合. 图 9(b)为荷载值 100 kN, 四根梁跨中位置沿截面等高度处的混凝土应变值. 可以看出, 截面 165 mm 高度处混凝土应变接近 0, 上部明显为压应变, 下部为拉应变, 随着剪跨比增大, 相同截面高度处混凝土应变数值绝对值也增大. 综合分析, 两种材料的混凝土具有同步承受荷载的能力, 使得梁整体变形, 具有良好的整体性.

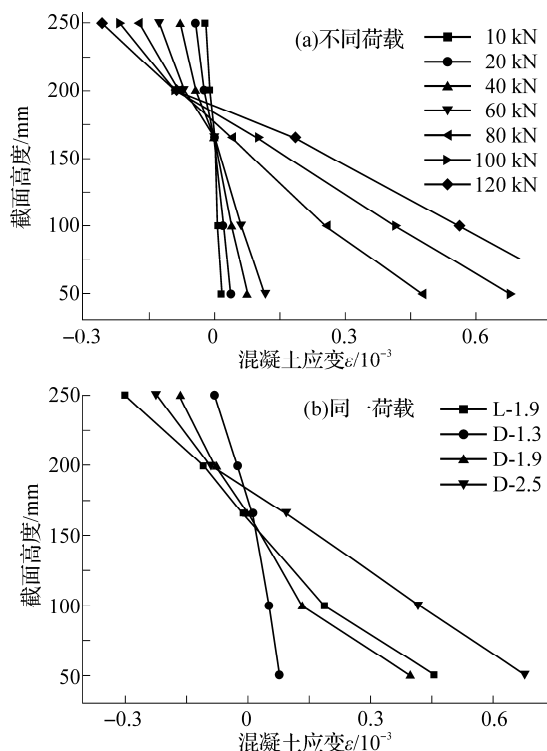


图9 混凝土应变曲线

## 4 抗剪承载力分析

本文试验主要研究不同剪跨比下陶粒混凝土叠浇梁的抗剪性能. 试验梁出现初始微裂缝的荷载为开裂荷载, 破坏时的荷载为极限荷载. 本试验定义构件梁斜裂缝宽度达到 1.5 mm 或斜裂缝端部受压区混凝土剪切破坏时, 为梁达到承载力极限状态, 四根梁的破坏形式均为剪切破坏. 试验设计制作叠浇梁整体工作性能良好, 未在叠浇结合面处出现破坏, 因此不考虑叠浇结合面的影响, 根据混凝土结构设计规范<sup>[7]</sup>中梁抗剪承载力计算公式, 考虑到叠浇梁中两种混凝土强度差异, 按照下式计算叠浇梁抗剪承载力.

$$V_{cs} = \frac{1.75}{\lambda + 1} b(f_{t1}h_{01} + f_{t2}h_{02}) + f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0,$$

式中  $f_{t1}$ 、 $h_{01}$  为叠浇梁下部陶粒混凝土抗拉强度和叠浇高度;  $f_{t2}$ 、 $h_{02}$  为叠浇梁上部普通混凝土抗拉强度和叠浇高度.

将计算结果与试验结果相比较, 见表 6. 对比分析 D-1.3、D-1.9、D-2.5 的极限承载力可以得出, 随着剪跨比的增大, 叠浇梁受剪极限承载力减小. 由文献<sup>[8-9]</sup>可知, 对于新旧混凝土叠合梁, 在承受集中荷载作用下, 斜截面受剪承载力主要由剪压区混凝土抗压强度控制, 即叠合层混凝土的强度起主要作用, 再生混凝土叠合梁的抗剪承载力略高于普通整浇梁. 对比剪跨比相同的全陶粒混凝土梁和叠浇梁, 后浇的上部普通混凝土相当于叠合层, 普通混凝土强度高于陶粒混凝土强度, 从而使得叠浇梁的抗剪承载力比全陶粒混凝土要高出 12.8%. 4 根梁的试验值均比理论计算值高出 40% 左右, 且剪跨比越小, 理论计算值与实际值差值幅度越大. 一方面是因为试验设计为保证构件梁抗剪破坏而不发生抗弯破坏, 保证纵筋配筋的配筋量, 纵向受力钢筋对梁的抗剪有销栓作用, 较大的

表6 试验梁受剪承载力试验值与理论值比较

| 梁     | 剪跨比 $\lambda$ | 开裂荷载 | 计算值 $V_u^c$ /<br>(kg·m <sup>-3</sup> ) | 测试值 $V_u^t$ /<br>(kg·m <sup>-3</sup> ) | 相对百分差/% |
|-------|---------------|------|----------------------------------------|----------------------------------------|---------|
| L-1.9 | 1.9           | 38   | 164.6                                  | 258.0                                  | 36.2    |
| D-1.3 | 1.3           | 64   | 213.7                                  | 385.5                                  | 44.6    |
| D-1.9 | 1.9           | 42   | 182.5                                  | 291.0                                  | 37.3    |
| D-2.5 | 2.5           | 36   | 162.0                                  | 220.5                                  | 26.5    |

纵筋配筋率能够提高梁的抗剪承载力; 另外由于理论计算抗剪承载力有一定的安全储备.

## 5 结论

(1) 陶粒混凝土与普通混凝土叠合浇筑的梁在有效减轻构件自重的条件下, 可提高构件抗剪承载力, 且叠浇梁能够整体变形, 共同承受荷载作用, 具有良好的整体性.

(2) 所设计的陶粒混凝土与普通混凝土叠浇梁, 在同一加载级别下, 随着剪跨比的增大, 梁的跨中挠度和斜截面最大裂缝均呈增大趋势. 抗剪破坏时, 箍筋部分屈服, 纵筋均未屈服.

(3) 叠浇梁抗剪承载力随着剪跨比的增大而减小, 均大于规范理论值. 提高混凝土强度对抗剪承载力有积极作用.

## 参考文献:

- [1] 叶列平, 孙海林, 陆新征, 等. 高强轻骨料混凝土结构性能、分析与计算[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [2] 郑伦存. PK 预应力混凝土叠合板的试验研究与应用[D]. 长沙: 湖南大学, 2005.
- [3] 苑国良. 轻骨料混凝土建筑抗震性能好[J]. 城市与减灾, 2001(1):17-19.
- [4] 刘安庆, 汪一鸣, 王建民, 等. 纤维陶粒混凝土与普通混凝土粘结性能实验研究[J]. 宁波大学学报(理工版), 2016, 29(4):92-95.
- [5] 闫国新, 张雷顺. 新老混凝土粘结面粗糙度处理方法综述[J]. 混凝土, 2007(8):98-100.
- [6] GB50152-2012, 混凝土结构试验方法标准[S].
- [7] GB50010-2010, 混凝土结构设计规范[S].
- [8] 刘文春. 叠合梁斜截面抗剪性能及计算方法研究[D]. 合肥: 安徽建筑工业学院, 2010.
- [9] 王磊, 傅张俊. 不同剪跨比下再生混凝土与普通混凝土叠合梁抗剪性能研究[J]. 混凝土, 2013(6):110-113; 117.

# Shear performance of the ceramsite aggregate concrete stack poured beam with variant shear span ratios

WANG Yi-ming, LIU An-qing, SANG Qin-yang, WANG Jian-min\*

( Faculty of Architectural, Civil Engineering and Environment, Ningbo University, Ningbo 315211, China )

**Abstract:** The compressive zone uses normal strength concrete and the tensile zone uses ceramsite aggregate concrete. The combination of these two types of concrete takes advantages of the high compressive strength of the high normal strength concrete and the light weight as well as high ductility of the ceramsite concrete. To examine the overall working performance and failure characteristics of the stack poured beam under load, we build a whole ceramsite aggregate concrete beam with a shear span ratio of 1.9 and use ceramsite aggregate concrete at bottom and ordinary concrete at top to stack-pour three simple-supported beams with shear span ratios of 1.3, 1.9, and 2.5, respectively. We have also conducted the study on the effect of variant shear span ratio on the shear strength, deformation, maximum diagonal crack, longitudinal reinforcement, and stirrup strain. Results show that the overall working performance of the designed stack poured beam is satisfying; the midspan deflection and the maximum diagonal crack increase with the increase of the shear span ratio. When the ultimate bearing capacity is reached, part of the stirrup yields while the longitudinal reinforcement does not. The four beams undergo a typical shear failure but maintain overall integrity.

**Key words:** stack poured concrete beam; ceramsite aggregate concrete; shear performance; shear span ratio

(责任编辑 韩 超)