

文章编号: 1000-4750(2015)12-0108-09

高强轻骨料混凝土深弯构件受剪模型分析

刘 喜, 吴 涛, 魏 慧, 刘伯权, 邢国华

(长安大学建筑工程学院, 陕西, 西安 710061)

摘 要: 根据集中荷载作用下 8 根剪跨比 0.26~1.04、跨高比为 2 和 3 的 LC40 级高强轻骨料混凝土简支深弯构件受剪性能试验结果, 重点分析了该类混凝土深弯构件的破坏过程与破坏形态。在试验研究的基础上, 建立了基于软化拉-压杆模型计算理论的高强轻骨料混凝土深弯构件受剪承载力计算模型, 并应用该模型完成了 22 组该类构件受剪承载力试验计算与我国 GB50010-2010、ACI318-08、CSA 和 EC2 等现有规范计算结果及软化拉-压杆模型计算结果的对比分析。分析表明: 高强轻骨料混凝土深弯构件破坏形态分为剪切破坏和弯剪破坏两种, 剪跨比 $\lambda \leq 1$, 其受剪承载力基本由混凝土斜压杆控制, 软化拉-压杆模型计算结果接近试验值, 与现行规范计算结果相当, 但软化拉-压杆模型有明确的力学模型, 能够合理反映深弯构件受力机理。

关键词: 轻骨料混凝土; 深弯构件; 拉-压杆模型; 软化效应; 受剪承载力

中图分类号: TU375 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2014.05.0364

SHEAR STRENGTH MODEL FOR HIGH-STRENGTH LIGHTWEIGHT AGGREGATE CONCRETE DEEP FLEXURAL MEMBERS

LIU Xi, WU Tao, WEI Hui, LIU Bo-quan, XING Guo-hua

(School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710061, China)

Abstract: According to the test results due to the action of a concentrated load for eight simply supported deep flexural members whose shear span to depth ratios and span-depth ratios are 0.26~1.04 and 2, as well as 3, respectively, and made of LC40 high-strength lightweight aggregate concrete under, the failure process and failure pattern of this kinds of deep flexural members are analyzed emphatically. The shear capacity model is established, based on softened strut-and-tie model for high-strength lightweight concrete deep flexural members. The model is used to calculate the shear strength of these 24 members, the results of which have been compared with the results accepted from the shear formulas suggested by current design codes, GB50010-2010, ACI318-08, CSA and EC2. Results shows that the failure pattern for high-strength lightweight concrete deep flexural members could be divided into shear failure and flexure-shear failure, and its shear capacity is controlled by concrete diagonal strut. The results of softened strut-and-tie model approach to the data from tests, and agree with the results of the current codes. But the softened strut-and-tie model has a definite mechanical model and can reasonably reveal the failure mechanism of deep flexural members.

Key words: lightweight aggregate concrete; deep flexural member; strut-and-tie model; softened effect; shear strength

收稿日期: 2014-05-03; 修改日期: 2014-11-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(51108032, 51308065); 陕西省科技统筹创新工程计划项目(2015KTZDSF03-04); 长安大学创新团队项目(2013G3282015); 中央高校基本科研业务费项目(2014G2280014); 高等学校博士学科点专项科研基金项目(优先发展领域)(20130205130001)

通讯作者: 吴 涛(1976—), 男, 安徽霍山人, 教授, 工学博士, 从事钢筋混凝土结构抗震研究(E-mail: wutao@chd.edu.cn).

作者简介: 刘 喜(1986—), 男, 陕西延安人, 博士生, 从事钢筋混凝土结构抗震研究(E-mail: lliuxii@163.com);

魏 慧(1990—), 女, 新疆巴楚人, 硕士生, 从事钢筋混凝土结构抗震研究(E-mail: 357843258@qq.com);

刘伯权(1956—), 男, 甘肃定西人, 教授, 工学博士, 博导, 从事钢筋混凝土结构抗震研究(E-mail: bqliu@chd.edu.cn);

邢国华(1983—), 男, 内蒙古呼和浩特人, 副教授, 工学博士, 从事钢筋混凝土结构抗震研究(E-mail: guohuachd@yahoo.com).

在大量深受弯构件受剪性能试验研究基础上^[1-4], 圣维南原理和弹性理论表明^[5], 深受弯构件内部应力状态复杂, 基于平截面假定和桁架模型的传统截面设计方法不适用于深受弯构件。然在桁架模型基础上发展起来的拉-压杆模型已广泛应用于深受弯构件设计中^[6-9], 其合理性也得已证实, 设计思想也已包含在不同的设计规范中^[10-12], 并应用于指导实践, 包括美国国家公路与运输协会标准 AASHTO、美国 ACI318、加拿大 CSA.A23.4 规范及欧洲 EC2 规范等。我国混凝土结构设计规范 (GB50010-2010) 中深受弯构件的受剪承载力设计公式是在基于经验和理论回归基础上提出的, 缺乏明确的力学模型^[13-14]。

高强轻骨料混凝土具有强度高、质量轻、耐久性好等特点, 已广泛应用于桥梁工程、高层建筑等^[15-17], 将其作为结构中的深受弯构件部分, 能有效减小截面尺寸、减轻结构自重, 有利于改善整体结构抗震性能。然其弹性模量低, 脆性明显, 易发生剪切破坏, 故深受弯构件受剪设计显得尤为重要。同时, 我国现行《轻骨料混凝土结构技术规程》(JGJ12-2006)^[18]未列入深受弯构件相关条款, 对深受弯构件受剪性能研究尚处于空白。

基于此, 本文开展了 8 根高强轻骨料混凝土深受弯构件受剪性能试验研究及理论分析, 并提出合理的受剪分析模型。通过试验, 重点分析该类构件的破坏过程及破坏模式, 在拉-压杆模型计算理论基础上, 推导出基于软化拉-压杆模型的高强轻质深受弯构件受剪分析模型, 完成包括本文试验构件在内的 22 组高强轻质混凝土深受弯构件的受剪承载力计算及对比分析。

1 试验概况

1.1 试件设计及制作

试验设计了 8 根深受弯构件, 试件长度分为 1250 mm 和 1750 mm 两种, 截面尺寸为 130 mm×500 mm, 试件剪跨比分为 0.26、0.52、0.78 和 1.04 这 4 个水平, 跨高比为 2 和 3。所有试件钢筋配置完全相同, 纵向受拉配筋率为 1.00%, 水平分布配筋率为 0.80%, 竖向分布配筋率为 0.39%。各试件设计参数见表 1, 试件尺寸及配筋见图 1。

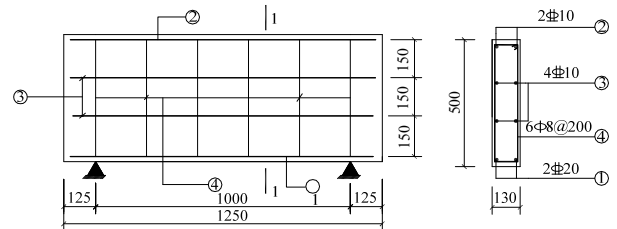
试件采用高强轻骨料混凝土浇筑, 其中轻骨料采用宜昌宝珠陶粒公司生产的强度为 800 级页岩陶粒, 细骨料采用普通砂和陶砂按 3:1 比例混合配

置, 水泥为 PO42.5 普通硅酸盐水泥。试件混凝土强度等级为 LC40, 配合比见表 2。预留 3 组 3 块标准立方体试块, 试块与试件在同等条件下养护。最终测得其干表观密度为 1790 kg/m³, 所得混凝土轴心抗压强度 $f_{ck}=27.3$ MPa。

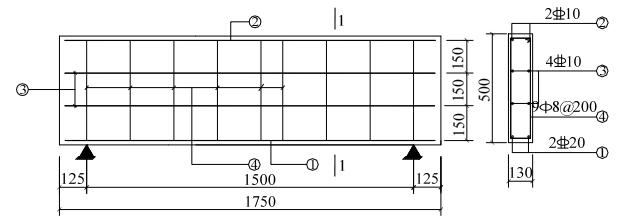
表 1 试件参数

Table 1 Parameters of test specimens

试件编号	截面尺寸 $b \times h / \text{mm}^2$	剪跨 a / mm	净跨 l_n / mm	剪跨比 λ	跨高比 l_n / h	纵筋配筋率 $\rho / (\%)$	竖向腹筋配筋率 $\rho_v / (\%)$
HSLCB-1	130×500	125	1000	0.26	2	1.00	0.39
HSLCB-2	130×500	125	1500	0.26	3	1.00	0.39
HSLCB-3	130×500	250	1000	0.52	2	1.00	0.39
HSLCB-4	130×500	250	1500	0.52	3	1.00	0.39
HSLCB-5	130×500	375	1000	0.78	2	1.00	0.39
HSLCB-6	130×500	375	1500	0.78	3	1.00	0.39
HSLCB-7	130×500	500	1000	1.04	2	1.00	0.39
HSLCB-8	130×500	500	1500	1.04	3	1.00	0.39



(a) 长度为 1250 mm 的试件尺寸及配筋图



(b) 长度为 1750 mm 的试件尺寸及配筋图

图 1 试件尺寸及配筋图

Fig.1 Dimension and reinforcement of specimens

表 2 高强轻骨料混凝土配合比

Table 2 Mix proportion for high-strength lightweight concrete

混凝土材料	水泥	砂+陶	陶粒	水	减水剂	粉煤灰
设计配合比	1	1.56	1.1	0.4	0.022	0.22
1m ³ 用量/kg	432	675	475	173	9.5	95
试验配合比	1	1.68	1.1	0.368	0.022	0.22

1.2 试验结果

试件两端简支, 各个阶段特征荷载及最终破坏模式见表 3。定义试件出现首条斜裂缝或剪跨内斜裂缝高度超过梁高的一半时对应的荷载为斜向开裂荷载^[19], 记为 V_{cr} 。同时, 定义任意斜截面裂缝宽度达到 0.2 mm 时对应的荷载为构件临界斜裂缝荷载^[20], 荷载记为 $V_{0.2}$ 。由表 3 可见, 该类高强轻质混凝土深受弯构件斜向开裂荷载大约为极限荷

载的 20%~30%，临界斜裂缝荷载为极限荷载的 50%~70%。试验表明，该类高强轻质混凝土深受弯构件主要发生剪切破坏和弯剪破坏两种典型破坏形态，随着剪跨比增大，深受弯构件承载力明显下降，试件的弯曲效应逐渐明显，破坏形态逐渐由剪切破坏向弯剪破坏转化。同时，相同剪跨比下，跨高比对集中荷载作用下深受弯构件的受剪承载力影响较小。

表 3 主要试验结果与构件破坏形态
Table 3 Main test results and failure modes

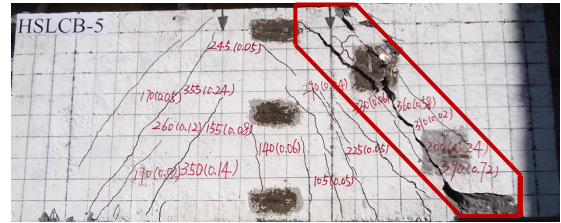
试件编号	开裂荷载 V_{cr}/kN	临界斜裂缝荷载 $V_{0.2}/kN$	极限荷载 V_u/kN	V_{cr}/V_u	$V_{0.2}/V_u$	破坏模式
HSLCB-1	195	435	655.0	0.30	0.66	剪切
HSLCB-2	115	270	605.0	0.19	0.53	剪切
HSLCB-3	130	385	615.0	0.21	0.63	剪切
HSLCB-4	110	200	575.0	0.19	0.35	剪切
HSLCB-5	125	260	465.0	0.27	0.56	剪切
HSLCB-6	105	225	470.5	0.22	0.48	剪切
HSLCB-7	100	190	318.5	0.31	0.60	剪切
HSLCB-8	95	230	360.0	0.26	0.64	弯剪 ^[19]

1.3 破坏形态

以典型试件 HSLC-5 为例说明剪切破坏过程。试件开裂前，剪力主要由混凝土承担，钢筋的应力很小。随荷载增加，试件首先在跨中附近出现竖向弯曲裂缝，宽度较小，大约为 0.02 mm，随后随着荷载继续增大，竖向裂缝很快向上延伸至梁高一半处，且大约在距试件底面 $h/3$ 处出现首条斜裂缝，宽度约为 0.04 mm，并向支座及加载点延伸，此时认为试件达到斜向开裂状态。随着荷载的进一步增大，早期形成的弯曲裂缝发展较慢，甚至停止发展，而原有斜裂缝宽度继续增加，最大裂缝宽度增至 0.2 mm，随后荷载进一步增大，迅速沿试件高度方向向加载点延伸。同时新的斜裂缝不断在剪跨范围内形成。此时，试件进入临界斜裂缝阶段，此时梁端荷载大约为极限荷载的 50%左右。随后继续加载，裂缝宽度继续增加，剪跨范围内裂缝数目明显增多，裂缝最大宽度增至 2 mm，且有明显的劈裂声发出，伴随着试件发出的巨响，最终在加载点附近的受压区混凝土压碎，试件达到极限状态。并在试件沿高度边缘 $h/2$ 处有水平裂缝出现。试件 HSLCB-5 的破坏形态见图 2(a)。

试件 HSLCB-8 发生弯剪破坏，最终破坏形态如图 2(b)所示。临界斜裂缝阶段前，其裂缝形态及其它试验特征与剪切破坏特征基本相似。当进入该阶段后，斜裂缝数目虽然明显增加且布满整个剪跨

范围，但其宽度缓慢增加，反而，纯弯段竖向弯曲裂缝继续向外或向上迅速发展，试件破坏被推迟。临界斜裂缝阶段完成后，继续加载，试件斜截面裂缝和弯曲裂缝继续增加，最终，由于斜截面骨料被剪断引起构件破坏。弯剪破坏过程中，跨中弯曲裂缝充分发展，构件最终在斜截面发生剪切破坏。



(a) 试件 HSLCB-5 破坏形态



(b) 试件 HSLCB-8 破坏形态

图 2 试件破坏形态

Fig.2 Failure model of specimens

2 软化拉-压杆模型建立

2.1 宏观模型

图 3 为深受弯构件的受力简图，图中： V_{bh} 和 V_{bv} 分别表示深受弯构件剪跨范围的水平和竖向剪力， C 和 T 分别表示深受弯构件梁上部混凝土压杆的合力和梁下部钢筋拉杆的合力， h_{ct} 为 C 和 T 之间的垂直距离， a 为剪跨，即加载点至支座中点的距离， h 为截面高度。由图 3 近似可得：

$$\frac{V_{bv}}{V_{bh}} \approx \frac{h_{ct}}{a} \tag{1}$$

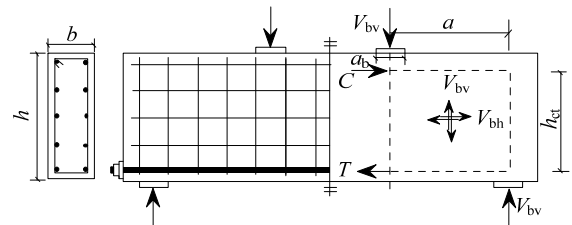


图 3 深受弯构件受力计算简图

Fig.3 Forces in web of deep flexural member

文献[21]根据线性弯曲理论且忽略水平腹筋影响，对于双筋矩形截面梁， h_{ct} 近似按下式计算：

$$h_{ct} = h - \frac{kh}{3} \quad (2)$$

式中： kh 表示深受弯构件的混凝土截面受压区高度，系数 k 参考下式计算：

$$k = \frac{\sqrt{[n\rho + (n-1)\rho']^2 + 2[n\rho + (n-1)\rho'h'] - [n\rho + (n-1)\rho']}}{2} \quad (3)$$

式中： n 为弹性模量比，即 $n = E_s/E_c$ ； ρ 和 ρ' 分别表示构件底部受拉纵筋和顶部受压钢筋的配筋率； h' 表示压杆合力 C 至构件顶部的垂直距离。通过式(2)可近似估计合力 T 和 C 相对某点的力臂及构件受力中性轴的高度。

图 4 为软化拉-压杆模型的深受弯构件抗剪模型机构组成，该抗剪机构由斜向机构、水平机构和竖向机构三部分构成，其中斜向机构由一对角斜压杆构成(图 4(a))，斜压杆与水平轴向夹角 θ 为：

$$\theta = \arctan\left(\frac{h_{ct}}{a}\right) \quad (4)$$

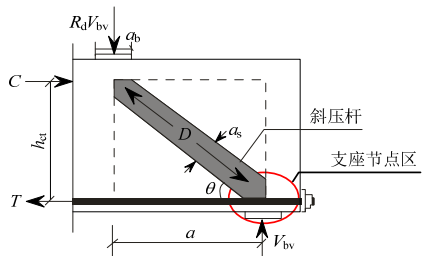
当深受弯构件开裂后，混凝土主压应力方向与斜向机构混凝土压杆方向一致，有效混凝土斜压杆面积 A_{str} 为：

$$A_{str} = a_s \times b_s \quad (5)$$

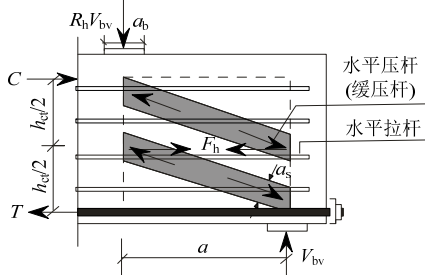
式中： a_s 表示斜压杆高度； b_s 为斜压杆的宽度，可近似取构件腹板宽度；斜压杆高度 a_s 根据构件边界条件进行确定，由加载支座与构件受压区高度决定，通过下式进行计算：

$$a_s = \sqrt{(kh)^2 + a_b^2} \quad (6)$$

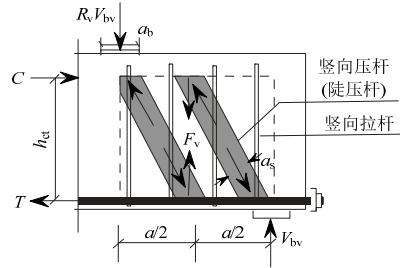
式中 a_b 为支座宽度。



(a) 斜向机构



(b) 水平机构



(c) 竖向机构

图 4 软化拉-压杆模型传力机构组成

Fig.4 Decomposition of force transferring frame of soften strut-and-tie model

水平机构(图 4(b))由一个水平拉杆和两个水平缓压杆组成，水平拉杆由水平腹筋组成。竖向结构(图 4(c))包括一个竖向拉杆和两个陡斜压杆，箍筋组成竖向拉杆。

2.2 平衡条件

图 5 为剪跨范围内深受弯构件的拉-压杆模型受力图，深受弯构件的水平向和竖向剪力可估计为：

$$V_{jh} = -D \cos \theta + F_h + F_v \cot \theta \quad (7)$$

$$V_{jv} = -D \sin \theta + F_h \tan \theta + F_v \quad (8)$$

式中： D 为斜向机构中的压力； F_h 为水平拉杆的拉力； F_v 为竖向拉杆的拉力。根据 Schäfer 等^[22]的研究：

$$F_h = \gamma_h \times V_{jh} \quad (9a)$$

$$\gamma_h = \frac{2 \tan \theta - 1}{3} \quad (9b)$$

$$F_v = \gamma_v \times V_{jv} \quad (10a)$$

$$\gamma_v = \frac{2 \cot \theta - 1}{3} \quad (10b)$$

式中： γ_h 为水平拉杆与水平剪力的比值； γ_v 为竖向拉杆与竖向剪力的比值。

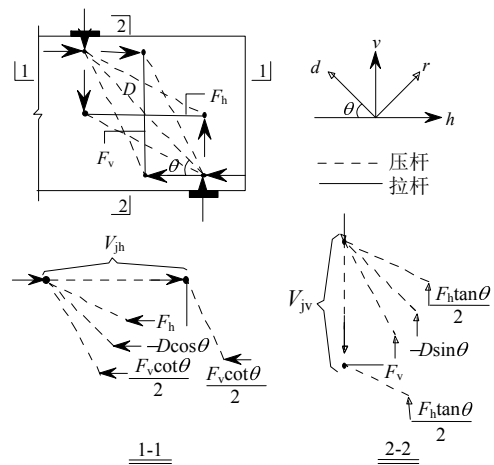


图 5 拉-压杆模型

Fig.5 Strut-and-tie model at maximum response

同时, 假定 3 种抗力存在以下比例关系:

$$-D \sin \theta : F_h \tan \theta : F_v = R_d : R_h : R_v \quad (11)$$

其中, R_d 、 R_h 、 R_v 为 3 种机构之间的比例关系, 通过下式计算:

$$R_d = \frac{(1-\gamma_h)(1-\gamma_v)}{1-\gamma_h\gamma_v} \quad (12)$$

$$R_h = \frac{\gamma_h(1-\gamma_v)}{1-\gamma_h\gamma_v} \quad (13)$$

$$R_v = \frac{\gamma_v(1-\gamma_h)}{1-\gamma_h\gamma_v} \quad (14)$$

且同时满足 $R_d + R_h + R_v = 1$, 为了方便计算, 式(11)可表示为:

$$D = \frac{-1}{\sin \theta} \times \frac{R_d}{(R_d + R_h + R_v)} \times V_{bv} \quad (15)$$

$$F_h = \frac{1}{\tan \theta} \times \frac{R_h}{(R_d + R_h + R_v)} \times V_{bv} \quad (16)$$

$$F_v = \frac{R_v}{(R_d + R_h + R_v)} \times V_{bv} \quad (17)$$

由 3 种机构抗力共同作用下(如图 6 所示), 深受弯构件压杆范围内混凝土最大压应力 $\sigma_{d,max}$ 为:

$$-\sigma_{d,max} = \frac{1}{A_{str}} \left\{ -D + \frac{\cos \left[\theta - \arctan \left(\frac{h_{ct}}{2a} \right) \right]}{\cos \left[\arctan \left(\frac{h_{ct}}{2a} \right) \right]} F_h + \frac{\cos \left[\arctan \left(\frac{2h_{ct}}{a} \right) - \theta \right]}{\sin \left[\arctan \left(\frac{2h_{ct}}{a} \right) \right]} F_v \right\} \quad (18)$$

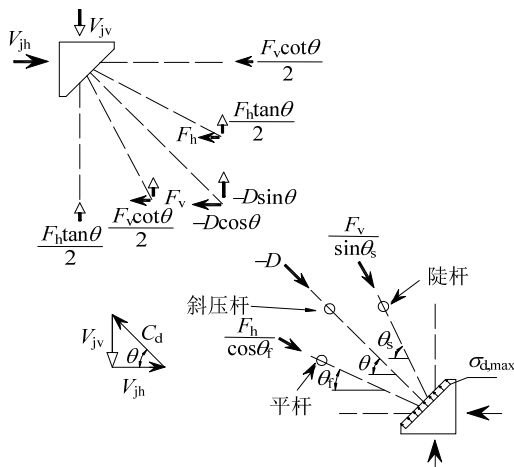


图 6 混凝土压杆中各向分力

Fig.6 Forces in concrete struts

根据图 6 进一步整理可得:

$$-\sigma_{d,max} = \frac{1}{A_{str}} \left[-D + \frac{F_h}{\cos \theta_f} \cos(\theta - \theta_f) + \frac{F_v}{\sin \theta_s} \cos(\theta_s - \theta) \right] = \frac{1}{A_{str}} \left[-D + \frac{F_h}{\cos \theta} \left(1 - \frac{\sin^2 \theta}{2} \right) + \frac{F_v}{\sin \theta} \left(1 - \frac{\cos^2 \theta}{2} \right) \right] \quad (19)$$

式中: $\sigma_{d,max}$ 以受压为正; θ_f 和 θ_s 分别为平缓压杆、陡峭压杆与水平轴的夹角。当 $\sigma_{d,max}$ 达到混凝土的峰值应力, 即深受弯构件达到了其承载力峰值。

2.3 本构关系

文献[23]计算表明, 轻质混凝土深受弯构件与普通混凝土深受弯构件在单调加载条件下, 受剪能力基本相似。开裂混凝土的本构模型参考 Zhang 和 Hsu^[24]建议的表达式并结合轻质混凝土自身特性, 选取下式:

$$\sigma_d = -\zeta f'_c \left[1.5 \left(\frac{-\varepsilon_d}{\zeta \varepsilon_0} \right) - 0.5 \left(\frac{-\varepsilon_d}{\zeta \varepsilon_0} \right)^2 \right], \quad \frac{-\varepsilon_d}{\zeta \varepsilon_0} \leq 1 \quad (20)$$

$$\zeta = \frac{5.8}{\sqrt{f'_c}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1+400\varepsilon_t}} \leq \frac{0.9}{\sqrt{1+400\varepsilon_t}} \quad (21)$$

其中: σ_d 为混凝土在 d 向上的主应力; ζ 为混凝土软化系数; f'_c 为混凝土圆柱体抗压强度; ε_d 、 ε_t 分别为混凝土的主压应变和主拉应变。常应变 ε_0 可通过下式计算:

$$\varepsilon_0 = 0.002 + 0.001 \left(\frac{f'_c - 20}{80} \right), \quad 20 \leq f'_c \leq 100 \quad (22)$$

当构件极限抗压强度 $-\sigma_d$ 小于开裂混凝土的强度 $\zeta f'_c$ 时, 可认为构件抗剪强度将继续增大, 直到二者相等为止, 此时混凝土的应力需满足:

$$\sigma_d = -\zeta f'_c \quad (23)$$

$$\varepsilon_d = -\zeta \varepsilon_0 \quad (24)$$

钢筋本构关系认为满足理想的弹塑性模型,

即:

$$\text{当 } \varepsilon_s < \varepsilon_y \text{ 时, } f_s = E_s \varepsilon_s \quad (25)$$

$$\text{当 } \varepsilon_s \geq \varepsilon_y \text{ 时, } f_s = f_y \quad (26)$$

则:

$$F_h = A_{th} E_s \varepsilon_h \leq F_{yh} \quad (27)$$

$$F_v = A_{tv} E_s \varepsilon_v \leq F_{yv} \quad (28)$$

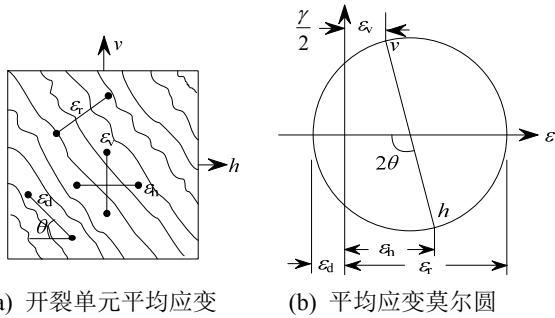
式中: A_{th} 和 A_{tv} 分别为水平和竖直拉杆的面积; F_{yh} 和 F_{yv} 分别为水平和竖直拉杆屈服时的拉力。

2.4 变形协调

二维薄膜单元应该满足莫尔圆应变协调条件(如图7), 即:

$$\varepsilon_r + \varepsilon_d = \varepsilon_h + \varepsilon_v \quad (29)$$

式中: ε_d 、 ε_r 分别为混凝土的主压应变和主拉应变; ε_h 、 ε_v 分别为混凝土水平向和竖向的平均应变。通过式(29)可计算 ε_r 的值, 进而进行式(21)的计算, 便可得到混凝土的软化系数值。



(a) 开裂单元平均应变 (b) 平均应变莫尔圆
图7 开裂混凝土平均应变莫尔圆

Fig.7 Compatibility conditions for diagonally cracked concrete

2.5 计算过程

将上述力的平衡方程、材料本构关系及应变协调条件联立求解, 即可得计算结果, 图8为求解过程流程图。

- 1) 根据已知条件, 整理数据, 计算 θ 、 f'_c 、 f_{yh} 、 f_{yv} 、 A_{str} 、 A_{th} 、 A_{tv} 、 E_s 、 ε_0 , 从而计算 γ_h 、 γ_v 。
- 2) 利用步骤1)计算结果, 计算 R_d 、 R_h 、 R_v 。
- 3) 合理给定 V_{bv} , 计算力 D 、 F_h 、 F_v , 然后根据式(19)、式(27)、式(28)计算 $\sigma_{d,max}$ 、 ε_h 、 ε_v 。
- 4) 合理给定 ε_d , 通过式(29)计算 ε_r , 确定混凝土的软化作用。当 $1/2 < \tan\theta < 2$ 时, ε_r 通过式(29)计算; 当 $\tan\theta \leq 1/2$ 时, $\varepsilon_h = 0$, 即水平机构抗力零, ε_r 由 ε_v 和 ε_d 来决定; 同理当 $\tan\theta \geq 2$ 时, $\varepsilon_v = 0$, ε_r 由 ε_h 和 ε_d 来决定。当无腹筋或腹筋屈服时, 采用屈服应变($\varepsilon_h = 0.002$ 或 $\varepsilon_v = 0.002$)计算 ε_r 。
- 5) 计算混凝土软化系数 ζ 。
- 6) 通过本构关系, 计算给定的 ε_d 对应的 σ_d 的值。
- 7) 比较 $-\sigma_{d,max}$ 和 σ_d 的值。若 $-\sigma_{d,max} < \sigma_d$, 重复步骤3)~步骤6), 直到 $-\sigma_{d,max} \geq \sigma_d$ 。
- 8) 满足步骤7)后, 比较 $-\varepsilon_d$ 和 $\zeta\varepsilon_0$ 的值。若 $-\varepsilon_d < \zeta\varepsilon_0$, 重新给定 ε_d , 重复步骤4)~步骤7), 直到 $-\varepsilon_d \geq \zeta\varepsilon_0$, 结束求解。

完成以上步骤, 即可得支座反力 V_{bv} 及钢筋混凝土深受弯构件截面的抗剪强度 σ_d 。

3 试验验证

如图8所示, 试件在剪跨范围内斜压杆机构表现明显。应用上述软化拉-压杆模型计算过程, 编制MATLAB计算程序, 对本文和文献[23]共22组高强轻质混凝土深受弯构件进行计算, 计算结果见表4。

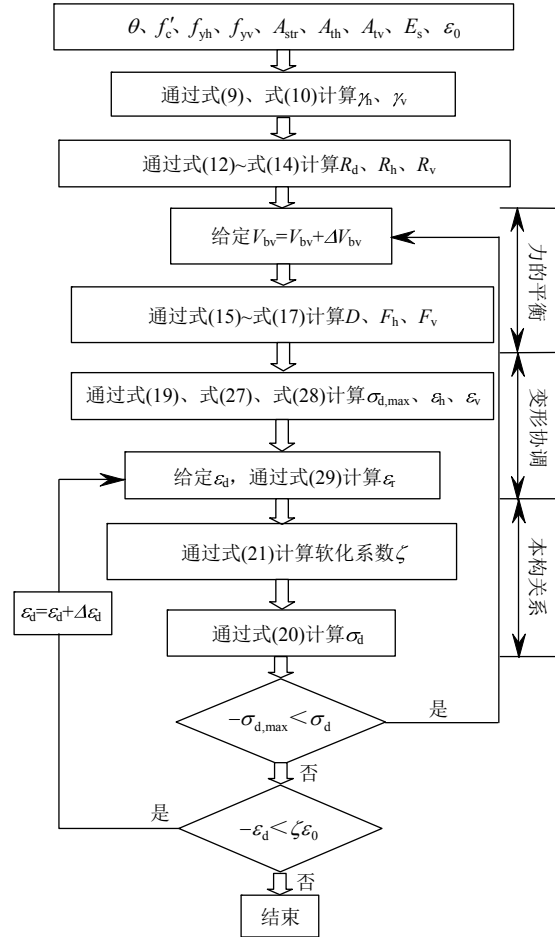


图8 计算流程图

Fig.8 Flow chart showing solution algorithm

同时, 参考文献[23]中各国规范建议计算方法及我国混凝土结构设计规范(GB50010-2010)中建议方法对22组深受弯构件进行计算, 计算及对比分析结果见表4, 图9为按照各种方法计算得到的试件受剪承载力与试验值的比值随不同混凝土强度的变化情况。表4和图9可以看出: 1) 试验值与我国混凝土结构设计规范(GB50010-2010)、美国ACI318-08、加拿大CSA A23.3-04、欧洲EC2规范建议方法计算结果比值的均值分别为1.234、1.210、1.170和1.171, 方差分别为0.144、0.026、0.087和0.085, 表明各国规范建议深受弯构件受剪承载力计算方法适用于该类高强轻质混凝土深受弯构件受剪承载力计算, 且计算结果与试验值吻合较好;

2) 软化拉-压杆模型方法计算结果与试验结果吻合良好, 试验值与其比值的均值和方差分别为 1.161 和 0.048, 与规范计算结果相当, 适用于高强轻质

混凝土深受弯构件受剪承载力计算; 3) 软化拉-压杆模型具有明确的力学模型, 可应用于高强轻骨料混凝土深受弯构件受剪承载力的计算与预测。

表 4 高强轻质混凝土深受弯构件计算结果对比

Table 4 Comparison of the models between codes and tests for high strength lightweight aggregate specimens

文献	试件编号	$f_{cu}/$ MPa	θ	$A_{str}/$ mm ²	$V_{exp}/$ kN	规范公式计算值 V_n/kN				$V_{SSTM}/$ kN	V_{exp}/V_n				V_{exp}/V_{SSTM}
						GB10	ACI	CSA	EC2		GB10	ACI	CSA	EC2	
本文	HSLCB-1	40.78	72.5	26689	655.0	316.5	425.4	414.6	424.4	764.1	2.07	1.54	1.58	1.54	0.86
	HSLCB-2		72.5	26689	605.0	412.8	425.4	414.6	424.4	764.1	1.47	1.42	1.46	1.43	0.79
	HSLCB-3		57.8	26689	615.0	316.5	402.4	392.2	405.7	539.2	1.94	1.53	1.57	1.52	1.14
	HSLCB-4		57.8	26689	575.0	367.1	402.4	392.2	405.7	539.2	1.57	1.43	1.47	1.42	1.07
	HSLCB-5		46.6	26689	465.0	316.5	346.1	337.4	353.0	362.7	1.47	1.34	1.38	1.32	1.28
	HSLCB-6		46.6	26689	470.5	334.8	346.1	337.4	353.0	362.7	1.41	1.36	1.40	1.33	1.30
	HSLCB-7		38.5	26689	318.5	316.5	289.2	281.9	297.6	343.1	1.01	1.10	1.13	1.07	0.93
	HSLCB-8		38.5	26689	360.0	310.7	289.2	281.9	297.6	343.1	1.16	1.25	1.28	1.21	1.05
文献 [23]	S5-6	47.34	61.1	21979	355.0	221.8	329.0	337.8	306.7	277.4	1.60	1.08	0.97	1.10	1.28
	S5-7.5		60.9	32343	416.0	345.0	334.5	414.0	311.9	281.5	1.21	1.24	0.81	1.33	1.48
	S5-10		60.0	39905	423.5	437.4	385.5	456.4	360.5	344.9	0.97	1.10	0.85	1.27	1.23
	S10-4		60.2	51741	433.5	591.4	387.2	492.2	362.1	447.8	0.73	1.12	0.79	1.36	0.97
	S10-6		40.2	21979	241.0	166.3	238.2	151.2	257.6	162.3	1.45	1.01	1.58	0.59	1.48
	S10-7.5		40.7	32343	286.0	258.7	251.9	208.1	257.6	239.6	1.11	1.14	1.21	0.81	1.19
	S10-10		39.9	39905	312.5	328.0	306.1	235.9	314.8	293.9	0.95	1.02	1.30	0.75	1.06
	A5-6		40.4	51741	317.5	443.5	314.3	270.2	314.8	382.4	0.72	1.01	1.16	0.86	0.83
	A5-7.5		60.9	23044	299.5	207.0	263.2	290.8	245.2	251.7	1.45	1.14	0.91	1.19	1.19
	A5-10		60.8	34045	338.5	322.0	267.6	347.9	249.4	231.0	1.05	1.27	0.77	1.40	1.47
A10-4	41.77	59.8	42039	341.0	408.2	308.4	385.9	288.2	283.0	0.84	1.11	0.80	1.34	1.20	
A10-6	60.1	54597	368.0	551.9	309.8	412.4	289.5	368.4	0.67	1.19	0.75	1.43	1.00		
A10-7.5	40.0	23044	209.0	155.2	190.5	132.2	205.9	132.6	1.35	1.10	1.44	0.64	1.58		
A10-10	40.5	34045	228.0	241.5	201.5	177.2	205.9	196.5	0.94	1.13	1.14	0.86	1.16		
均值											1.234	1.210	1.170	1.171	1.161
方差											0.144	0.026	0.087	0.085	0.048

注: 表中 V_{SSTM} 表示软化拉-压杆模型方法计算结果; V_{GB10} 、 V_{ACI} 、 V_{CSA} 和 V_{EC2} 表示各国规范建议方法计算得到的深受弯构件受剪承载力。

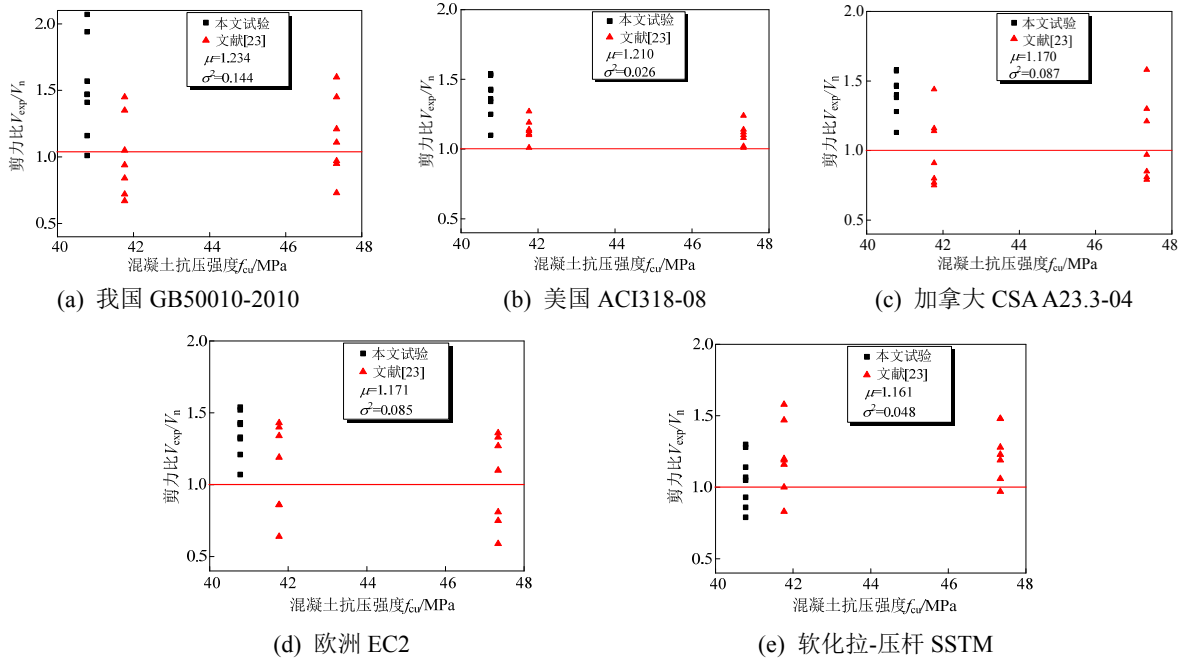


图 9 计算结果随混凝土强度等级的变化情况

Fig.9 Shear strength ratio versus concrete compressive strength

4 结论

(1) 试验研究表明, 该类高强轻骨料混凝土深受弯构件主要发生剪切破坏和弯剪破坏两种典型破坏形态, 随着剪跨比增大, 深受弯构件承载力明显下降, 试件的弯曲效应逐渐明显, 破坏形态逐渐由剪切破坏向弯剪破坏转化。同时, 相同剪跨比下, 跨高比对集中荷载作用下深受弯构件的受剪承载力影响较小。

(2) 应用规范建议计算方法和软化拉-压杆模型方法对高强轻质混凝土深受弯构件受剪承载力计算, 结果表明软化拉-压杆模型方法理论计算与试验结果接近, 与规范建议设计方法计算结果相当, 但软化拉-压杆模型方法有明确的力学计算模型, 能较为合理地反映构件的受力机理。

参考文献:

- [1] Wang Wei, Jiang Dahua, Thomas Hsu Chengtzu. Shear strength of reinforced concrete deep beams [J]. *Journal of Structures Engineering*, ASCE, 1993, 119(8): 2294—2312.
- [2] Russo G, Venir R, Pauletta M. Reinforced concrete deep beams- shear strength model and design formula [J]. *ACI Structural Journal*, 2005, 102(2): 429—437.
- [3] Quintero-Febres C G, Parra-Montesinos G, Wight J K. Strength of struts in deep concrete members designed using Strut-and-Tie method [J]. *ACI Structural Journal*, 2006, 103(4): 577—586.
- [4] 刘立新, 谢丽丽, 陈萌. 钢筋混凝土深受弯构件受剪性能的研究[J]. *建筑结构*, 2000, 30(10): 19—22.
Liu Lixin, Xie Lili, Chen Meng. The shear strength capability of reinforced concrete deep flexural member [J]. *Building Structure*, 2000, 30(10): 19—22. (in Chinese)
- [5] Jung-woong Park, Daniel Kuchma. Strut-and-tie model analysis for strength prediction of deep beams [J]. *ACI Structural Journal*, 2007, 104(6): 657—666.
- [6] 刘霞, 易伟建. 开孔深梁压杆拉杆模型构造[J]. *工程力学*, 2012, 29(12): 141—146.
Liu Xia, Yi Weijian. Strut-and-Tie model construction for deep beams with openings [J]. *Engineering Mechanics*, 2012, 29(12): 141—146. (in Chinese)
- [7] 吴轶, 蔡健, 杨春, 陈庆军. 基于软化拉-压杆模型内置钢构架型钢混凝土深梁受剪承载力预测[J]. *工程力学*, 2009, 26(11): 134—139.
Wu Yi, Cai Jian, Yang Chun, Chen Qingjun. Prediction of shear strength of steel truss reinforced concrete deep beam based on Softened Strut-and-Tie model [J]. *Engineering Mechanics*, 2009, 26(11): 134—139. (in Chinese)
- [8] 张文学, 李建中, 龙佩恒. 拉-压杆模型合理性量化评价指标研究[J]. *工程力学*, 2009, 26(5): 52—57.
Zhang Wenxue, Li Jianzhong, Long Peiheng. Quantification index research for the rationality of Strut-and-Tie model [J]. *Engineering Mechanics*, 2009, 26(5): 52—57. (in Chinese)
- [9] 叶列平, 孟杰, 王宇航. 拉-压杆模型在钢筋混凝土深梁设计中的应用[J]. *建筑科学与工程学报*, 2009, 26(2): 81—86.
Ye Lieping, Meng Jie, Wang Yuhang. Application of Strut-and-Tie model in design of reinforced concrete deep beams [J]. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 2009, 26(2): 81—86. (in Chinese)
- [10] ACI Committee 318, Building Code Requirement for Structural Concrete (ACI318-08) and Commentary (ACI318R-08) [S]. American Concrete Institute, 2008.
- [11] CSA A23.3-04, Design of concrete structures [S]. Canadian Standards Association, 2004.
- [12] The European Standard EN 1992-1-1: 2004, Eurocode 2. Design of concrete structures [S]. British Standards Institution, 2004.
- [13] GB50010-2010, 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
GB50010-2010, Code for design of concrete structures [S]. Beijing: China Architectural & Building Press, 2010. (in Chinese)
- [14] GB50011-2010, 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
GB50011-2010, Code for seismic design of buildings [S]. Beijing: China Architectural & Building Press, 2010. (in Chinese)
- [15] 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.
Ye Lieping, Sun Hailin, Lu Xinzheng, et al. High-strength lightweight reinforced concrete structure- performance, analysis and calculation [M]. Beijing: Science Press, 2009. (in Chinese)
- [16] 邵永健. 型钢轻骨料混凝土梁的力学性能及设计方法的试验研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2007.
Shao Yongjian. Experimental study on mechanical performance and design method of steel reinforced lightweight aggregate concrete beams [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture & Technology, 2007. (in Chinese)
- [17] 孙海林, 丁建彤, 叶列平. 高强轻骨料混凝土在桥梁工程中的应用及发展[C]. 第 15 届全国桥梁学术会议论文集. 上海: 同济大学出版社, 2002: 787—793.
Sun Hailin, Ding Jiantong, Ye Lieping. The development and application of high-strength lightweight aggregate concrete in bridge engineering [C]. Proceedings of the 15th National Conference on Bridge, Shanghai: Tongji University Press, 2002: 787—793. (in Chinese)
- [18] JGJ12-2006, 轻骨料混凝土结构设计规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.

- JGJ12-2006, Technical specification for lightweight aggregate concrete structures [S]. Beijing: China Architectural & Building Press, 2006. (in Chinese)
- [19] Tan K H, Kong F K, Teng S, et al. High-strength concrete deep beams with effective span and shear span variations [J]. *ACI Structural Journal*, 1995, 92(4): 395—405.
- [20] Salandra Miguel A, Ahmad S H. Shear capacity of reinforced lightweight high-strength concrete beams [J]. *ACI Structural Journal*, 1989, 86(6): 697—704.
- [21] Hwang S J, Lee H J. Strength prediction for discontinuity regions by softened strut-and-tie model [J]. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 2002, 128(12): 1519—1526.
- [22] Schâfer K. Strut-and-tie models for the design of structural concrete [R]. Taiwan: Cheng Kung University, 1996, 32(10): 1376—1381.
- [23] Yang Keun-Hyeok. Test on lightweight concrete deep beams [J]. *ACI Structural Journal*, 2010, 107(6): 663—670.
- [24] Zhang L X, Hsu Thomas T C. Behavior and analysis of 100 MPa concrete membrane elements [J]. *Journal of the Structural Division*, ASCE, 1998, 124(1): 24—34.

(上接第 98 页)

- [17] 朱东生, 劳远昌, 沈大元, 等. 桥梁地震反应分析中输入地震波的确定[J]. *桥梁建设*, 2000(3): 1—4.
Zhu Dongsheng, Lao Yuanchang, Shen Dayuan, et al. Determination of seismic waves introduced into bridge seismic response analysis [J]. *Bridge Construction*, 2000(3): 1—4. (in Chinese)
- [18] Ren W X, Obata M. Elastic-plastic seismic behavior of long span cable-stayed bridges [J]. *Journal of Bridge Engineering* ASCE, 1999, 4(3): 194—203.
- [19] Wu Q, Takahashi K, Chen B. Using cable finite elements to analyze parametric vibrations of stay cables in cable-stayed bridges [J]. *Structural Engineering and Mechanics*, 2006, 23(6): 691—711.
- [20] 西南交通大学结构工程试验中心. 雅泸高速公路干海子大桥荷载试验报告[R]. 四川: 西南交通大学结构工程试验中心, 2012: 45.
Structural Engineering Test Center of Southwest Jiaotong University. Load test report of Ganhaizi Bridge in highway from Ya'an to Lugu [R]. Sichuan: Test Center of Structural Engineering in Southwest Jiaotong University, 2012: 45. (in Chinese)
- [21] 吴庆雄, 黄育凡, 陈宝春. 钢管混凝土组合桁梁-格构墩轻型桥梁振动台阵试验研究[J]. *工程力学*, 2014, 31(9): 89—96.
Wu Qingxiong, Huang Yufan, Chen Baochun. Shaking tables testing study of lightweight bridge with CFST composite truss girder and lattice pier [J]. *Engineering Mechanics*, 2014, 31(9): 89—96. (in Chinese)
- [22] 聂利英, 李建中, 范立础. 复杂结构地震动输入方向的基本原理及其影响[J]. *地震工程与工程振动*, 2003, 23(3): 30—34.
Nie Liying, Li Jianzhong, Fan Lichu. Principle and effect of critical angle of complicated structure in dynamic analysis [J]. *Earthquake engineering and engineering vibration*, 2003, 23(3): 30—34. (in Chinese)
- [23] JTJ 004-99, 公路工程抗震设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 1989.
JTJ 004-99, Specifications of earthquake resistant Design for highway engineering [S]. Beijing: China Communications Press, 1989. (in Chinese)
- [24] 四川省交通厅公路规划勘察设计研究院. 公路钢管混凝土桥梁设计与施工指南[M]. 北京: 人民交通出版社, 2008: 10—11.
Sichuan Provincial Communications Department Highway Planning Survey and Design Institute, Guide to design and construction technology of road steel tube concrete bridge [M]. Beijing: China Communications Press, 2008: 10—11. (in Chinese)