

复合砂浆钢筋网加固短梁抗剪承载力计算方法

毋晨¹, 方圣恩¹, 吴应雄¹, 陈富强², 陈思辉³, 刘龙龙⁴

(1. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350108; 2. 福建建工集团有限责任公司, 福建 福州 350001;

3. 福建卓越建设集团有限公司, 福建 福州 350001; 4. 中国建筑第二工程局有限公司, 北京 101149)

摘要: 复合砂浆钢筋网加固法性能良好、施工简单且成本较低, 但当前缺少该法加固钢筋混凝土短梁的抗剪承载力计算方法。为此, 在修正拉-压杆理论基础上考虑受拉纵筋和抗剪分布钢筋对加固短梁的影响, 提出采用短梁的受压区高度作为上部节点高度, 根据 Kupfer-Gerstle 破坏准则建立了水泥砂浆钢筋网加固短梁的计算模型, 进而推导了加固短梁抗剪计算公式。通过已有文献 16 根加固短梁的试验结果验证, 表明所推导的抗剪承载力公式计算结果与试验结果吻合良好, 说明该公式可以较可靠地预测复合砂浆钢筋网加固简支短梁的实际抗剪承载力, 可为相关的工程计算提供参考。

关键词: 复合砂浆钢筋网; 钢筋混凝土短梁; 抗剪加固; 修正拉压杆模型(MSTM); 抗剪承载力公式

中图分类号: TU375.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2023)04-0154-06

Shear Strength Calculation Method of Concrete Short Beams Strengthened by Ferrocement with Composite Mortar

WU Chen¹, FANG Sheng'en¹, WU Yingxiong¹, CHEN Fuqiang², CHEN Sihui³, LIU Longlong⁴

(1. School of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China;

2. Fujian Construction Engineering Group Co., Ltd., Fuzhou, Fujian 350001, China;

3. Fujian Zhuoyue Construction Group Co., Ltd., Fuzhou, Fujian 350001, China;

4. China Construction Second Engineering Bureau Ltd., Beijing 101149, China)

Abstract: The strengthening technology using ferrocement with composite mortar has its merits of high performance, easy to handle and relatively low strengthening costs. However, the calculation method has not been proposed for predicting the shear capacities of short beams strengthened by ferrocement. Considering the effects of longitudinal tensional bars and shear distribution reinforcement on the strengthened beams, this paper attempts to deduce the shear strength formula based on the modified strut-and-tie model (MSTM), which comes from the Kupfer-Gerstle failure criterion by taking the height of the compression zone of short beams as the height of the top nodes. The deduced formula has been validated using the experimental results of 16 strengthened short beams in the literature. It is found that the predictions by the proposed formula agree well with the experimental measurements, which proves the reliability of the proposed formula in predicting the shear strengths of simply-supported short beams strengthened by ferrocement with composite mortar. The formula can be used as reference for relevant engineering calculation.

Keywords: ferrocement with composite mortar; reinforced concrete short beams; shear strengthening; modified strut-and-tie model (MSTM); shear strength formula

现代混凝土结构中的深受弯构件在承受重型荷载方面有非常广泛的应用。由于一些人为因素(设

计施工有误、配合比误差、材料质量不合格)及自然因素(地震、火灾)的影响,钢筋混凝土结构或构件

收稿日期:2023-04-17

修稿日期:2023-05-13

基金项目:福州市科技计划项目(2021-Y-084);中建二局科技资助(2022QN120002)

作者简介:毋晨(1996—),男,硕士研究生,研究方向为结构加固。E-mail:200520075@fzu.edu.cn

通讯作者:方圣恩(1980—),男,教授,主要从事结构健康监测与加固等方面的研究工作。E-mail:shengen.fang@fzu.edu.cn

不可避免地产生不同程度的损伤,导致受力性能逐渐弱化,无法满足原本的设计荷载或新增荷载的要求,必须进行维养加固。目前常见的混凝土构件加固方式主要分为两类^[1]:一类是以“提高结构抗力”为核心的直接加固方法,如增大截面法、外包型钢加固法、粘贴钢板加固法^[2]、粘贴纤维复合材加固法^[3]、预张紧钢丝绳网片-聚合物砂浆面层加固法等;另一类是以“减小荷载效应”为核心的间接方法,如增设支点加固法。

复合砂浆钢筋网加固法是在混凝土构件表面绑扎钢筋网,用复合砂浆作为保护和锚固材料,使其共同工作以提升结构承载力的一种直接加固方法^[4],在国外已有应用^[5]。相较于其他加固方法,复合砂浆钢筋网加固混凝土结构的优势在于:复合砂浆的抗拉强度、刚度和温度线膨胀系数等均与混凝土十分相似,有较好地受力协调性和渗透性;加固材料的耐火性能、耐腐蚀性能及耐久性能良好;施工工艺相对简单。

混凝土梁按照跨高比可分为浅梁、短梁和深梁,目前《水泥复合砂浆钢筋网加固混凝土结构技术规范》^[6](CECS242—2016)中只有关于浅梁加固的相关设计与计算方法,并无加固短梁、深梁这类深受弯构件的相关规定和计算公式,主要原因在于破坏模式和计算模型的分析还不完善,对短梁来说更是如此。因此,在短梁的受力模型建立上,可以借鉴深梁的拉压杆模型(strut-and-tie model, STM)受力分析模式。STM 可以描述深梁的传力路径和受力特性:深梁中复杂应力流被等效为单轴受力的杆单元,拉杆、压杆和节点组成了整个 STM 模型,共同受力。Tan 等^[7]基于 Mohr-Coulomb 破坏准则推导了直接 STM,该模型考虑了受拉纵筋、抗剪钢筋对深梁抗剪承载力的影响,并且能考虑到横向拉应变引起的混凝土软化效应。在此基础上,Zhang Ning 等^[8]进一步修正了该模型中受拉纵向钢筋和抗剪钢筋对于深梁抗剪承载力的影响,提高了预测钢筋混凝土深梁的准确性。该模型不仅可以用于钢筋混凝土深梁上,对其他材料制成的深梁抗剪承载力预测准确率也很高^[9],将其用于加固深梁的抗剪承载力计算时,得到的计算结果与试验结果也吻合良好^[10-11]。Zhang Ning^[12]在前人的基础上,基于 Kupfer-Gerstle 破坏准则提出了修正的拉压杆模型(Modified STM, MSTM 模型),该模型在预测简支短梁和连续短梁的抗剪承载力上均表现出良好的准确性。然而,上述拉压杆模型的计算都要假设梁顶受压区节点的高度

为保护层厚度的两倍,需要多次迭代计算才能确定短梁的抗剪承载力。

将 STM 用于复合砂浆钢筋网加固短梁的抗剪承载力分析时,相关理论研究尚不成熟,缺乏实用的计算公式。为此,本文提出采用 MSTM 推导复合砂浆钢筋网加固短梁的抗剪承载力公式。模型使用 Kupfer-Gerstle 双轴拉压强度准则作为破坏准则,采用钢筋混凝土深梁的受压区高度作为上部节点高度,考虑了深梁发生剪切破坏时纵筋并未屈服的情况,最后通过试验梁数据验证所推导公式的适用性。

1 加固短梁抗剪受力模型和承载力计算

1.1 拉压杆模型

基于应力破坏准则的简支深梁 STM^[12]能考虑纵向受拉钢筋和分布筋对深梁抗剪承载力的影响,如图 1 所示。

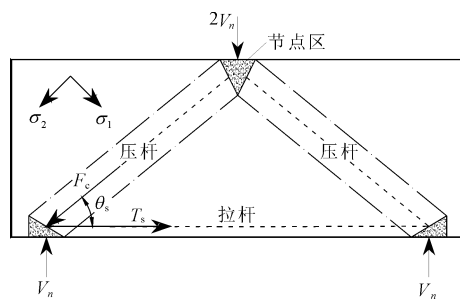


图 1 短梁 STM 模型示意图

基于 Kupfer-Gerstle 双轴拉压强度准则^[13],支座处节点区的应力关系为:

$$\frac{\sigma_1}{f_t} + 0.8 \frac{\sigma_2}{f_c} = 1 \quad (1)$$

式中: f_t 为沿主拉应力方向的节点区复合抗拉强度; f_c 为节点区材料的圆柱体抗压强度; σ_1 、 σ_2 分别表示节点区的主拉应力和主压应力。

根据斜压杆底部节点的力平衡关系可得

$$F_c = \frac{V_n}{\sin \theta_s} \quad (2)$$

$$T_s = \frac{V_n}{\tan \theta_s} \quad (3)$$

由文献[14]可知:

$$\theta_s = \arctan\left(\frac{jd}{a}\right) \quad (4)$$

$$jd = d - \frac{\gamma d}{3} = \left(1 - \frac{\gamma}{3}\right)d \quad (5)$$

式中: V_n 为深梁的抗剪承载力; F_c 为斜压杆承受的压力; T_s 为拉杆承受的拉力; θ_s 为斜压杆和拉杆的夹

角; a 是荷载与支座中心线的距离; d 是深梁的有效高度; jd 为 F_c 作用点到纵向受拉钢筋的垂直距离; γd 是受压区节点高度,系数 γ 被定义为^[12]:

$$\gamma = \sqrt{(n\rho)^2 + 2n\rho} - n\rho \quad (6)$$

式中: n 是纵向抗拉钢筋弹性模量 E_{st} 与混凝土弹性模量 E_c 的比值,取 $E_{st} = 200 \text{ GPa}$ 、 $E_c = 4700\sqrt{f'_c}$,其中 f'_c 为混凝土圆柱体抗压强度; ρ 为纵向受拉钢筋配筋率。

1.2 主拉和主压应力

支座处节点区的主拉应力可按下式计算^[14]:

$$\sigma_1 = \frac{kT_s \sin \theta_s}{A_c / \sin \theta_s} \quad (7)$$

式中: k 为斜压杆应力不均匀系数,按文献[8] 取为 4; A_c 为短梁有效横截面面积,且 $A_c = (b + 2t)jd$,其中 t 为水泥砂浆加固层厚度, b 为短梁横截面宽度。

考虑到拉杆分力对短梁抗剪有利,支座处节点区的主压应力可表示为:

$$\sigma_2 = \frac{F_c - T_s \cos \theta_s}{A_{str}} \quad (8)$$

$$A_{str} = (b + 2t) \times (l_a \cos \theta_s + l_b \sin \theta_s) \quad (9)$$

式中: A_{str} 为斜压杆的横截面面积,斜压杆宽度如图 2 所示; l_a 为受压节点高度,取保护层厚度的两倍; l_b 为加载垫板宽度。

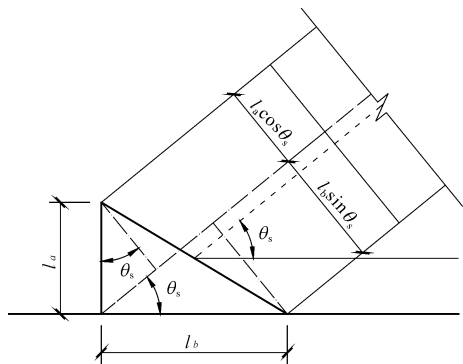


图 2 斜压杆宽度示意图

1.3 组合抗压和抗拉强度

加固梁支座节点区由性质不同的多种材料构成,将这些材料性质按受力机制组合在一起,形成加固梁的组合抗压强度和抗拉强度。

加固梁支座节点区的抗压强度由原构件与加固层提供的抗压强度两部分构成。

$$f_c = \frac{f'_c b h + [(2t + b)t + 2th]f_{cm}}{(b + 2t)(h + t)} \quad (10)$$

式中: h 为短梁高度; f_{cm} 为复合水泥砂浆的圆柱体抗压强度。

加固梁支座节点区的抗拉强度由原构件与加固层提供的抗拉强度两部分构成:

$$f_t = f_{tc} + f_{tm} \quad (11)$$

原构件支座节点区的抗拉强度 f_{tc} 分别由混凝土本身、构件的抗剪水平分布钢筋、构件的箍筋和构件的纵向受拉钢筋提供。

$$f_{tc} = f_{ct} + f_{ss} + f_{sv} + f_{sh} \quad (12)$$

式中: f_{ct} 、 f_{sh} 、 f_{sv} 和 f_{ss} 分别是混凝土、抗剪水平分布钢筋、箍筋和纵向受拉钢筋提供的抗拉强度。

加固层支座节点区的抗拉强度 f_{tm} 由复合砂浆、加固箍筋和加固水平分布钢筋部分提供。

$$f_{tm} = f_{mt} + f_{asv} + f_{ash} \quad (13)$$

式中: f_{mt} 、 f_{ash} 和 f_{asv} 分别是复合砂浆、抗剪水平分布钢筋和箍筋提供的抗拉强度。

1.3.1 混凝土提供的抗拉强度

钢筋混凝土短梁达到抗剪极限承载力时,混凝土已经出现了很多裂缝,其抗拉强度 f_{ct} 按文献[15] 公式计算:

$$f_{ct} = 0.31\sqrt{f'_c} \left(\frac{\varepsilon_{cr}}{\varepsilon_1} \right)^{0.4} \quad (14)$$

式中: ε_{cr} 是混凝土开裂时的应变,按 0.000 08 取值^[16]; ε_1 是混凝土斜压杆的主拉应变,按下式计算:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_s + (\varepsilon_s + \varepsilon_2) \cot^2 \theta_s \quad (15)$$

式中: ε_s 是构件纵筋的拉伸应变,按 0.002 取值; ε_2 是混凝土斜压杆压碎时的极限压应变,按 0.003 3 取值^[17]。

1.3.2 钢筋提供的抗拉强度

短梁箍筋和抗剪分布钢筋与斜压杆相交,在受荷的过程中产生拉力 T 。由于钢筋是离散的,其产生的拉力也是离散的。为了方便计算拉力 T 对斜压杆的影响,由文献[8] 可知,可假设拉力 T 产生的拉应力沿斜压杆呈线性分布,如图 3 所示。拉力 T 与拉应力之间的关系可由力和力矩平衡方程得到,即:

$$\left(\frac{k + k'}{2} \right) p_t \frac{A_c}{\sin \theta_s} = T \sin(\theta_s + \theta_w) \quad (16)$$

$$\left(\frac{k'}{2} + \frac{k - k'}{3} \right) \left(\frac{jd}{\sin \theta_s} \right)^2 b_w p_t = T \sin(\theta_s + \theta_w) \frac{d_w}{\sin \theta_s} \quad (17)$$

$$p_t = \frac{T \sin(\theta_s + \theta_w)}{A_c / \sin \theta_s} \quad (18)$$

式中: k 和 k' 为拉力 T 产生的拉应力的不均匀系数; θ_w 为钢筋与斜压杆轴线的夹角; d_w 表示钢筋与斜压杆轴线交点到梁顶的距离。

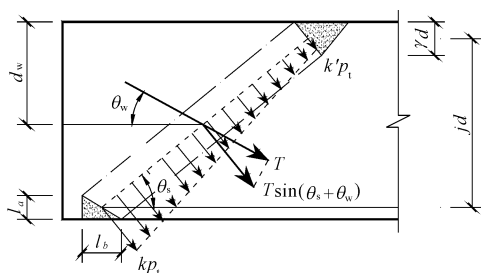


图3 等效拉应力分布图

则箍筋和抗剪分布钢筋提供的抗拉强度为:

$$f_{sv} = \frac{A_{sv} f_{yv} \sin 2\theta_s}{2A_c} \quad (19)$$

$$f_{\text{sh}} = \frac{A_{\text{sh}} f_{\text{yh}} \sin^2 \theta_s}{A_s} \quad (20)$$

式中: f_{sv} 为短梁箍筋提供的抗拉强度; f_{sh} 为短梁抗剪水平分布钢筋提供的抗拉强度; f_y 为纵向受拉钢筋的屈服强度; f_{yv} 为箍筋的屈服强度; f_{yh} 为抗剪水平分布钢筋的屈服强度。

同理,加固箍筋和加固分布钢筋提供的抗拉强度为:

$$f_{\text{asv}} = \frac{A_{\text{asv}} f_{\text{ayv}} \sin 2\theta_s}{2A_o} \quad (21)$$

$$f_{\text{ash}} = \frac{A_{\text{ash}} f_{\text{ayh}} \sin^2 \theta_s}{A_c} \quad (22)$$

式中: A_{asv} 、 A_{ash} 分别为加固箍筋和加固水平筋的面积; f_{ayv} 、 f_{ayh} 分别为加固箍筋和加固水平筋的屈服强度。

钢筋混凝土短梁发生剪切破坏时,纵向钢筋通常不会屈服,为此文献[9]提出了纵向受拉钢筋提供的抗拉强度的计算公式:

$$f_{ss} = \frac{4\mu f_y A_s \sin\theta_s}{A_c / \sin\theta_s} \quad (23)$$

式中: f_{ss} 为短梁纵向受拉钢筋提供的抗拉强度; μ 是纵向受拉钢筋的强度利用系数; A_s 为短梁纵向受拉钢筋面积。

$$\mu = \frac{\eta}{\sqrt{\lambda \rho f_v / 335}}$$

式中: η 为回归参数,按文献[10]取0.179; λ 为剪跨比。

1.3.3 复合砂浆提供的抗拉强度

复合砂浆对加固层支座节点区的抗拉强度贡献可按面积折减为:

$$f_{\text{mt}} = \frac{[(2t + b)t + 2th]}{(b + 2t)(h + t)} f'_{\text{mt}} \quad (24)$$

式中: f_{mt}' 为复合砂浆的抗拉强度; f_{mt} 为复合砂浆折

减后的抗拉强度。

由上述公式可知,原构件支座节点区抗拉强度为:

$$f_{tc} = f_{ct} + f_{sv} + f_{sh} + f_{ss} = 0.31 \sqrt{f_c} \left(\frac{\varepsilon_{cr}}{\varepsilon_1} \right)^{0.4} + \frac{A_{sv} f_{yv} \sin 2\theta_s}{2A_c} + \frac{A_{sh} f_{yh} \sin^2 \theta_s}{A_c} + \frac{4\mu f_y A_s \sin \theta_s}{A_c / \sin \theta_s} \quad (25)$$

同理,加固层支座处抗拉强度为:

$$f_{\text{tm}} = f_{\text{mt}} + f_{\text{asv}} + f_{\text{ash}} = f_{\text{mt}}' + \frac{A_{\text{asv}} f_{\text{ayv}} \sin 2\theta_s}{2A_e} + \frac{A_{\text{ash}} f_{\text{ayh}} \sin^2 \theta_s}{A_e} \quad (26)$$

1.4 抗剪承载力

联合式(1)、式(2)、式(3)、式(7)、式(8)可得:

$$V_n = \frac{1}{\frac{4\sin\theta_s\cos\theta_s}{A_c f_t} + \frac{0.8\sin\theta_s}{A_{\text{slf}} f_c}} \quad (27)$$

$2V_n$ 即为复合砂浆钢筋网加固短梁的极限抗剪承载力。

2 抗剪承载力公式验证

文献[10]对 U 型高延性混凝土夹套加固钢筋混凝土短梁进行了三点弯曲试验,试件尺寸为 1 080 mm × 300 mm × 150 mm,箍筋使用 Φ6@150,梁底纵筋使用 2 Φ25,试件的剪跨为 540 mm。加固短梁发生剪切破坏,加固层未产生剥离现象,极限抗剪承载力提升了 13.6%~145.5% 不等;文献[15]对 FRP + ECC 水泥砂浆加固钢筋混凝土短梁进行了四点弯曲试验,试件尺寸为 1 700 mm × 300 mm × 200 mm,箍筋使用 Φ6@200,梁底纵筋使用 4 Φ20,试件的剪跨为 575 mm,加固短梁均发生剪切破坏,并且加固层在破坏后有不同程度的剥离,极限承载力提升了 27%~59%;文献[18]对应变硬化水泥基复合砂浆(HS-SHCC)加固钢筋混凝土短梁进行了三点弯曲试验,其试件尺寸大小为 1 500 mm × 350 mm × 180 mm,箍筋使用 Φ6@150,梁底纵筋使用 5 Φ25,试件的剪跨为 425 mm,加固短梁均发生剪切破坏,且加固层的剥离仅发生在跨中部分,极限抗剪承载力提升了 18.8%。采用上述文献中的试验短梁验证本文推导公式的适用性,试验结果与计算结果见于表 2。

以文献[19]构件 sb2 为例展示计算过程,其计算参数见表 1。

表 1 算例构件 sb2 参数

	参数	数值
几何参数	a/mm	575
	b/mm	200
	t/mm	30
	l_a/mm	30
	l_b/mm	100
	A_c/mm^2	59789.13
混凝土参数	f_c'/MPa	24.96
	A_s/mm^2	1256
	f_y/MPa	580
	A_{sv}/mm^2	113.04
	f_{yv}/MPa	574
	$\rho/\%$	2.09
加固层参数	n	8.517
	A_{asv}/mm^2	5.4
	A_{ash}/mm^2	10.8
	f_{ayh}/MPa f_{ayv}/MPa	357
	f_{cm}/MPa	21.06
	f_{mt}'/MPa	2.73

第一步:使用式(4)、式(5)计算加固短梁斜压杆和拉杆的夹角及有效高度;

$$jd = d - \frac{\gamma d}{3} = (1 - \frac{\gamma}{3})d = 229.96 \text{ mm}$$

$$\theta_s = \arctan(\frac{jd}{a}) = 0.38$$

第二步:使用式(10)、式(11) 计算加固短梁的组合抗压和抗拉强度;

$$f_c = \frac{f_c'bh + [(2t + b)t + 2th]f_{cm}}{(b + 2t)(h + t)} = 23.78 \text{ MPa}$$

$$f_t = f_{tc} + f_{tm} = 5.51 \text{ MPa}$$

第三步:使用式(7)、式(8) 计算加固短梁的支座区主拉和主压应力,将其代入式(1) 中,推导得到式(24),代入数值计算加固短梁的极限抗剪承载力。

$$V_n = \frac{1}{\frac{4\sin\theta_s \cos\theta_s}{A_c f_t} + \frac{0.8\sin\theta_s}{A_{st} f_c}} = 212.777 \text{ kN}$$

$2V_n = 425.554 \text{ kN}$ 即为该构件的极限抗剪承载力。

由表 2 可知,所推导的抗剪承载力计算值与试验值比值的均值为 1.030,标准差为 0.126,变异系数为 0.122,可见计算值与试验值吻合良好,离散性小,说明推导公式的准确性。值得一提的是,计算值/试验值出现最大负偏差的试件为文献[10]中的

B2W3,该构件的箍筋配置较大,发生破坏时受拉纵筋已达到极限强度,为安全起见,所推导公式仍按纵筋的屈服强度取值;出现最大正偏差的试件为文献[20]中的 s/d1.5s1 与 s/d1.5s2 两根相同试件,试验结果的离散性使得公式对其中一根预测值存在一定偏差。

表 2 加固短梁抗剪承载力计算值与试验值对比

文献	构件编号	计算值 /kN	实验值 /kN	计算值 试验值
文献[10]	B2W1	283.7669	260	1.091
	B2W1-25	387.0349	406	0.953
	B2W2	293.0457	279	1.050
	B2W2-25S	419.8354	474	0.886
	B2W2-25	396.9559	440	0.902
	B2W2-15	356.4279	362	0.985
	B2W3	360.1973	433	0.832
	B2W3-25	469.5701	492	0.954
	sb0	356.5628	296	1.205
	sb1	424.5232	376	1.129
文献[19]	sb2	425.554	449	0.948
	sb3	426.4697	471	0.905
文献[20]	s/d1.5r1	643.3247	540.8	1.190
	s/d1.5r1	643.3247	590.3	1.090
	s/d1.5s1	760.9828	619.8	1.228
	s/d1.5s2	760.9828	668.0	1.139
			平均值	1.030
			标准差	0.126
			变异系数	0.122

3 结 论

针对复合砂浆钢筋网加固短梁,基于 MSTM 提出了复合砂浆钢筋网加固短梁的抗剪承载力公式,通过已有文献的试验短梁验证,得到了以下结论:

(1) 采用修正拉压杆模型推导的复合砂浆钢筋网加固简支短梁抗剪承载力公式具有明确的力学意义,能综合考虑加固层的性能和配筋对加固短梁抗剪承载力的影响。

(2) 建立的模型考虑纵向抗拉钢筋与混凝土的影响确定钢筋混凝土短梁的受压区高度,并将其作为上部节点高度,省去了其他模型中迭代计算的过程。

(3) 使用 16 个加固短梁试件的试验结果对推导公式进行验证。结果表明,所得计算结果与试验值吻合良好,可为复合砂浆钢筋网加固简支短梁抗剪承载力计算提供参考。

参考文献:

[1] 混凝土结构加固设计规范:GB 50367—2013[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2013.

[2] 朱红兵,于亚刚,金伟良,等. 粘钢加固陶粒混凝土梁抗弯性能试验研究[J]. 水利与建筑工程学报,2023,21(2):156-161.

[3] 洪 雷,曲俊龙. 湿热环境下预应力 CFRP 加固高强混凝土梁的抗弯性能研究[J]. 水利与建筑工程学报,2019,17(3):94-98,114.

[4] 卜良桃,曾 坚,李 为. 钢纤维水泥砂浆钢筋网加固 RC 梁抗剪试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2012,39(2):7-11.

[5] ACI Committee. Design Guide for Ferrocement: ACI 549.1R—18[S]. American Concrete Institute, 2018.

[6] 水泥复合砂浆钢筋网加固混凝土结构技术规程:CECS242—2016[S]. 北京:中国计划出版社,2016.

[7] Tan K H, Tang C Y, Tong K. A direct method for deep beams with web reinforcement[J]. Magazine of Concrete Research, 2003,55(1):53-63.

[8] Zhang Ning, Tan Kanghai. Direct strut-and-tie model for single span and continuous deep beams[J]. Engineering Structures, 2007,29(11):2987-3001.

[9] 罗 敏,胡世翔,潘金龙. 基于拉压杆模型的 ECC 深梁受剪承载力分析[J]. 东南大学学报(自然科学版),2021,51(4):551-558.

[10] Li Ruizhe, Deng Mingke, Zhang Yangxi, et al. Shear strengthening of reinforced concrete deep beams with highly ductile fiber-reinforced concrete jacket[J]. Journal of Building Engineering, 2022,48:103957.

[11] Deng Mingke, Ma Fudong, Ye Wang, et al. Investigation of the shear strength of HDC deep beams based on a modified direct strut-and-tie model[J]. Construction and Building Materials, 2018,172:340-348.

[12] Zhang Ning. Strut-and-tie modelling of deep beams[D]. Singapore Nanyang Technological University, 2009.

[13] Kupfer H, Hilsdorf H K, Rusch H. Behavior of Concrete Under Biaxial Stresses[J]. Journal Proceedings, 1969,66(8):656-666.

[14] Hwang S J, Lu W Y, Lee H J. Shear strength prediction for deep beams[J]. Structural Journal, 2000,97(3):367-376.

[15] Belarbi A, Hsu T T C. Constitutive laws of concrete in tension and reinforcing bars stiffened by concrete[J]. Structural Journal, 1994,91(4):465-474.

[16] Building code requirements for structural concrete: ACI 318—19[S]. American Concrete Institute, 2019.

[17] Tan K H, Tong K, Tang C Y. Direct strut-and-tie model for prestressed deep beams[J]. Journal of Structural Engineering, 2001,127(9):1076-1084.

[18] 混凝土结构设计规范:GB 50010—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2015.

[19] Zheng Yuzhou, Wang Wenwei, Mosalam K M, et al. Experimental investigation and numerical analysis of RC beams shear strengthened with FRP/ECC composite layer[J]. Composite Structures, 2020,246:112436.

[20] Wei Jiaying, Wu Chang, Chen Yixin, et al. Shear strengthening of reinforced concrete beams with high strength strain-hardening cementitious composites (HS-SHCC)[J]. Materials and Structures, 2020,53(4):102.



(上接第 124 页)

[9] Zhuang Haiyang, Yu Xu, Zhu Chao, et al. Shaking table tests for the seismic response of a base-isolated structure with the SSI effect[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2014,67:208-218.

[10] 吴应雄,郑泽炜,颜桂云,等. 远场长周期地震动下桩-土-层间隔震结构振动台试验研究[J]. 建筑结构学报,2021,42(12):11-22.

[11] 许立英,吴应雄,田 泓. 长周期地震动下软土地基的偏心基础隔震结构振动台试验研究[J]. 建筑结构学报,2022,43(8):1-11.

[12] 吴应雄,胡贤忠,唐贞云,等. 长周期地震动下考虑 SSI 效应三种地基的层间隔震结构试验分析[J]. 水利与建筑工程学报,2022,20(6):143-148,194.

[13] 陈启冬,许立英,刘 阳,等. 不同土性地基考虑 SSI 效应的隔震结构地震响应分析[J]. 水利与建筑工程学报,2021,19(2):149-154,214.

[14] 常士骝,张苏民. 工程地质手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2007.