第 39 卷　第 2 期
2022 年 3 月

建筑科学与工程学报
Journal of Architecture and Civil Engineering

Vol. 39　No. 2
Mar. 2022

引用本文:程东辉,王楷文,宋　超. 预应力再生混凝土叠合梁受弯性能试验研究[J]. 建筑科学与工程学报,2022,39(2):52-60.
CHENG Dong-hui, WANG Kai-wen, SONG Chao. Experimental Study on Flexural Behavior of Prestressed Recycled Concrete Composite Beams[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2022, 39(2): 52-60.

DOI:10.19815/j.jace.2021.03096

预应力再生混凝土叠合梁受弯性能试验研究

程东辉,王楷文,宋　超
(东北林业大学 土木工程学院,黑龙江 哈尔滨　150040)

摘要:为研究无黏结预应力再生混凝土叠合梁构件的受弯性能,以再生混凝土在叠合梁中的位置、叠合层高度、构件的配筋率为参数,对 1 根预应力普通混凝土整浇梁、1 根预应力再生混凝土整浇梁和 6 根预应力再生混凝土叠合梁构件进行弯曲加载试验,分析了试验梁构件的受力过程和破坏形态,探讨了各参数对试验梁构件极限承载力的影响。基于试验数据,对承载力极限状态下无黏结预应力再生混凝土叠合梁承载力进行了验证。结果表明:当再生混凝土应用于预应力叠合梁受弯构件时,跨中截面沿高度的应变变化规律与截面平截面假定一致,普通混凝土与再生混凝土之间有较好的相互作用,能够协同受力,共同变形;无黏结预应力钢绞线的应力增量曲线为三折线,当再生混凝土位于预制层时,配筋相同条件下,预制层高度增加会延缓梁内纵向受力普通钢筋受拉屈服;相同预制层高度时,提高纵向钢筋强度可以有效提高梁的性能;与普通混凝土梁相比,再生混凝土梁裂缝数量相对较多,达到极限荷载时裂缝延伸高度相对较小;再生混凝土位于叠合层时,裂缝数量有所增加,裂缝间距相对较小;随着预制层高度和构件配筋率增加,试验梁平均裂缝间距逐渐增大。

关键词:预应力叠合梁;再生混凝土;静力试验;受弯性能;极限承载力
中图分类号:TU378.2　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1673-2049(2022)02-0052-09

Experimental Study on Flexural Behavior of Prestressed Recycled Concrete Composite Beams

CHENG Dong-hui, WANG Kai-wen, SONG Chao
(School of Civil Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China)

Abstract: In order to study the flexural behavior of unbonded prestressed recycled concrete composite beam members, the position of recycled concrete in the composite beam, the height of the composite layer, and the reinforcement ratio of the members were taken as parameters, one prestressed ordinary concrete cast-in-place beam, one prestressed recycled concrete cast-in-place beam and six prestressed recycled concrete composite beam members were subjected to bending loading tests. The stress process and failure modes of the test beam members were analyzed, and the effects of various parameters on the ultimate bearing capacity of test beam members were discussed. Based on the experimental data, the bearing capacity of the unbonded prestressed

收稿日期:2021-03-28
基金项目:哈尔滨市科技创新人才研究专项基金项目(2012RFXXS111);
中央高校基本科研业务费创新团队与重大项目培育资金项目(2572016EBC1)
作者简介:程东辉(1971-),男,黑龙江哈尔滨人,教授,工学博士,E-mail:chengdonghui2000@126.com。

recycled concrete composite beam under the ultimate bearing capacity state was verified. The results show that when recycled concrete is applied to the bending members of prestressed composite beam members, the strain change law along the height of the mid-span section is consistent with the assumption of the plane section, and there is a good interaction between ordinary concrete and recycled concrete, so they can cooperate to force and deformation. The stress increment curve of the unbonded prestressed steel strand is a three-fold line. When the recycled concrete is located in the precast layer, under the same condition of reinforcement, the increasing of the precast layer height will delay the tensile yield of the ordinary longitudinal stressed steel bars in the beam. With the same precast layer height, improving the strength of the longitudinal steel bars can effectively improve the performance of the beam. Compared with ordinary concrete beams, the number of cracks in recycled concrete beams is relatively large, and the crack extension height is relatively small when reaching the ultimate load. When the recycled concrete is located in the laminated layer, the number of cracks increases, and the crack spacing is relatively small. With the increases of precast layer height and member reinforcement ratio, the average crack spacing of test beams gradually increases.

Key words: prestressed composite beam; recycled concrete; static test; flexural behavior; ultimate bearing capacity

0　引　言

随着中国改革开放的深入推进，城市化进程不断加快，新建筑如雨后春笋般层出不穷，而部分既有建筑物或已达到设计年限，或因当时设计标准不能满足当代标准要求而面临被拆除的命运。拆除建筑时会产生大量的建筑垃圾，不仅不符合可持续发展的理念，而且会对生态环境造成不利的影响。如何对建筑垃圾进行合理利用是实现可持续发展的重要影响因素[1-4]。

再生混凝土是废弃混凝土经过破碎、清洗和分级，将其作为粗骨料或细骨料，按一定配合比配制而成的混凝土。将再生混凝土应用到工程结构中可以有效减少环境污染，节约资源，有利于建筑垃圾的再循环利用，促进国家生态文明建设。张毅等[5]对 5 根翼缘采用再生混凝土、腹板采用普通混凝土的 T 形截面叠合梁进行了受弯性能试验，结果表明：现行《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)[6]（以下简称《规范》）对再生混凝土 T 形截面叠合梁极限承载力的计算仍然适用。曹万林等[7]进行了不同再生粗骨料取代率和不同再生细骨料取代率在钢筋混凝土梁的正截面抗弯性能方面的测试，结果表明：在相同配筋和混凝土条件下的再生混凝土梁极限承载力和普通混凝土梁的极限承载力相近，再生粗骨料取代率对梁的受弯性能影响不是很明显，而再生细骨料对裂缝的分布以及梁的挠度有一定的影响。Arezoumandi 等[8]对 8 根不同再生粗骨料取代率试验梁进行了三分点弯曲加载试验，结果表明：再生混凝土梁不仅具有与普通混凝土梁相似的抗弯性能，而且再生混凝土梁的挠度比普通混凝土梁提高了约 13%。Knaack 等[9]研究发现随着再生骨料取代率的增加，再生混凝土梁的刚度降低，破坏时的挠度较大[10]。

综合国内外研究成果[11-26]可以看出：再生混凝土应用于梁受弯构件中是能够满足承载力要求的；由于再生混凝土自身材料的限制，导致再生混凝土梁受弯构件变形量较大，为解决这一问题，可以考虑将再生混凝土应用于预应力叠合梁受弯构件。为此，本文以再生混凝土梁受弯构件为研究对象，开展了预应力再生混凝土叠合梁受弯构件试验研究。本次叠合梁采用一次加载，主要考虑工程中施工阶段在预制梁下设有可靠支撑，能保证施工阶段作用的荷载全部传给支撑，浇筑叠合层及养护成型后撤出支撑。

1　试验概况

1.1　试验梁设计

设计制作了 8 根混凝土试验梁，其中包括 1 根预应力普通混凝土整浇梁 L0-1、1 根预应力再生混凝土整浇梁 L0-2 和 6 根预应力再生混凝土叠合梁，这 6 根试验梁分别以再生混凝土在叠合梁的位置、叠合层高度、构件的配筋率为参数；所有试验梁均为

一次受力构件。

试验梁长度为 4 100 mm，跨度为 3 900 mm，截面尺寸为 200 mm×350 mm。试验梁在预制层配置 1 根 ϕ^{s}15.2 的 1860 级无黏结预应力钢绞线，并设置了一定数量的普通纵向受力钢筋，在试验梁支座至加载点区段配置了 Φ10@100 的箍筋，以确保不发生斜截面受剪破坏。混凝土设计强度为 C40，保护层厚度为 25 mm。叠合面在二次浇筑前进行凿毛处理，预应力钢筋张拉控制应力 $\sigma_{con}=0.7f_{ptk}$（f_{ptk}为预应力钢筋强度标准值）。试验梁配合比设计见表 1，天然粗骨料和再生粗骨料的主要特性见表 2，试验梁截面配筋参数及分组编号见表 3，其中有效张拉预应力值的差异为预应力损失与人工张拉等原因造成的，对试验影响不大。试验梁尺寸及配筋见图 1。

表 1　配合比

Table 1　Mix Ratio

混凝土类别	水灰比	混凝土材料用量/(kg·m^{-3})					
		水	水泥	砂	天然粗骨料	再生粗骨料	减水剂
普通混凝土	0.34	155	450	746	1 199	0	4.3
再生混凝土	0.34	155	450	746	719	480	4.3

表 2　再生混凝土的主要特性

Table 2　Main Characteristics of Recycled Concrete

粗骨料种类	表观密度/(kg·m^{-3})	骨料粒径/mm	吸水率/%	压碎值/%
再生粗骨料	2 671	5～20	2.81	10.52
天然粗骨料	2 739	5～20	0.92	4.52

表 3　试验梁参数及配筋

Table 3　Test Beam Parameter and Reinforcement

试验梁编号	预制层材料	叠合层材料	预制层高度/mm	纵向受力钢筋	有效张拉预应力 σ_{pe}/MPa
L0-1	现浇普通混凝土梁			2Φ20	1 023
L0-2	现浇再生混凝土梁			2Φ20	1 121
L0-3	普通混凝土	再生混凝土	250	2Φ20	956
L1-1	再生混凝土	普通混凝土	200	2Φ20	946
L1-2	再生混凝土	普通混凝土	250	2Φ20	981
L1-3	再生混凝土	普通混凝土	280	2Φ20	1 047
L1-4	再生混凝土	普通混凝土	250	2Φ16	847
L1-5	再生混凝土	普通混凝土	250	2Φ25	946

试验前对试验梁的材料性能进行了测试，结果如表 4 和表 5 所示。

1.2　试验加载与测量方案

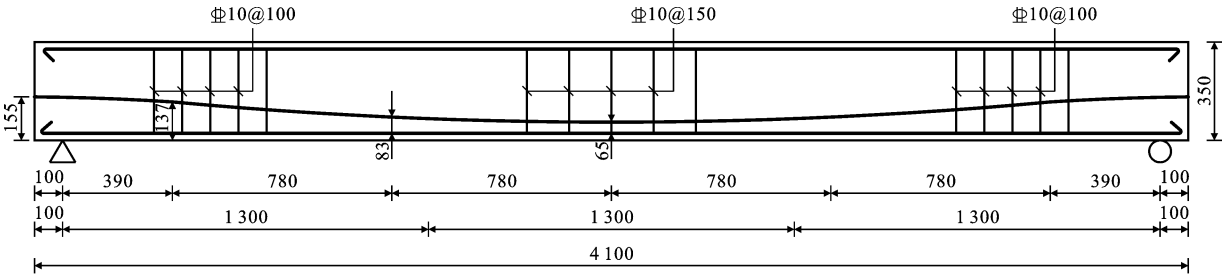
对试验梁采用两点集中加载，荷载 P 由位于千斤顶上部的压力传感器测量。每级荷载为计算极限承载力的 10%，当加载至纵向受力钢筋屈服后，改为位移控制加载，以承载力下降至极限荷载的 70% 作为终点。

试验过程中，设置如下测量装置：在支座加载点及梁跨中设置位移计用以监测试件梁变形；在纵向受力钢筋表面设置钢筋应变片，用以监测其应力变化；预应力钢筋应力由位于端部压力传感器进行监测；试验梁跨中沿截面高度方向在混凝土表面设置一定数量混凝土应变片，用以测量沿高度方向的应变变化，如图 2 所示。

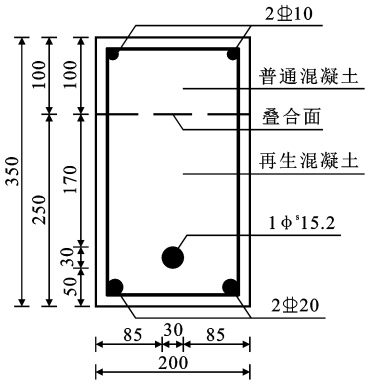
2　试验现象

试验梁 L0-1 与 L0-2 在试验过程中呈现较为相近的破坏形态：加载至极限荷载的 34% 左右时，试验梁跨中附近对称出现弯曲竖向裂缝；随着荷载的增加，不断有新的裂缝出现，而且裂缝的宽度及高度随着荷载的增加而不断增大。临近极限承载力时，梁内纵向受力普通钢筋首先屈服；此后继续加载，梁的挠度增长加快。当达到承载力极限状态时，跨中部分混凝土被压碎，随机试验梁宣告破坏。

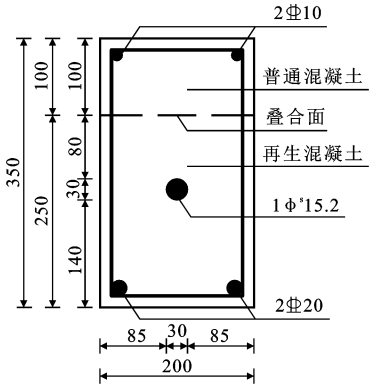
6 根试验梁在试验过程中呈现出与上述 2 根梁较为相近的破坏特征，荷载增加至极限荷载的 30% 左右时，梁控制截面首先出现第 1 条裂缝，相比于其他不断出现的裂缝，这条裂缝随着荷载的增加，其宽度与高度发展较快，当荷载增加至极限荷载的 60% 时，受拉区混凝土裂缝穿越叠合层并向受压区不断



(a)　梁箍筋配置



(b)　跨中截面



(c)　支座截面

图 1　试验梁截面尺寸及配筋(单位：mm)

Fig. 1　Cross-section Size and Reinforcement of Test Beam (Unit: mm)

表 4　混凝土实测力学性能

Table 4　Measured Mechanical Properties of Concretes

混凝土类别	$f_{cu,k}$/MPa	f_{ck}/MPa	f_{ts}/MPa	f_{tk}/MPa	$E_c/10^4$ MPa
普通混凝土	41.94	28.05	3.43	3.08	3.30
再生混凝土	33.13	22.16	2.27	2.71	3.08

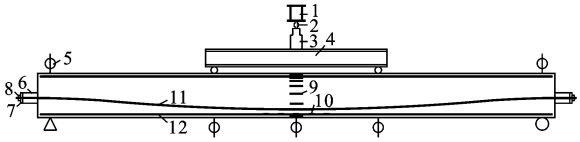
注：$f_{cu,k}$为混凝土实测立方体抗压强度；f_{ck}为混凝土轴心抗压强度标准值；f_{ts}为混凝土实测劈裂抗拉强度；f_{tk}为混凝土轴心抗拉强度标准值；E_c 为混凝土弹性模量。

表 5　钢筋力学性能

Table 5　Mechanical Properties of Steel Bars

钢筋种类	公称直径/mm	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	弹性模量/GPa
HRB400	10.0	429	602	210
HRB400	16.0	455	629	209
HRB400	20.0	445	625	211
HRB400	25.0	455	645	210
1860 级钢绞线	15.2	1 834	1 982	198

扩展。达到承载力极限状态时，6 根试验梁的受拉区普通钢筋先后屈服，但各梁呈现不同的破坏形态：试验梁 L1-4 达到承载力极限状态时钢筋虽然受拉屈服，但是受压区混凝土并未被压碎，由于其跨中控制截面挠度实测值已经超过计算跨度的 1/50，且试验梁呈现出挠度变形不断增加而承载力不断降低的现象，随即停止加载；其余 5 根试验梁的破坏形态均为“通纵向受拉钢筋屈服，加载点间受压区混凝土被



1—反力梁；2—压力传感器；3—千斤顶；4—分配梁；5—位移计；6—压力传感器；7—钢垫板；8—锚具；9—混凝土应变片；10—钢筋应变片；11—预应力钢绞线；12—普通纵向受力钢筋

图 2　试验加载装置

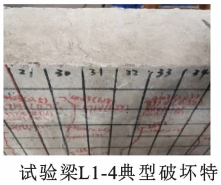
Fig. 2　Test Loading Device

压碎”。试验梁破坏形态及典型破坏特征如图 3 所示。

(a)　试验梁L0-3破坏形态

(b)　试验梁L1-4破坏形态

(c)　试验梁L0-3典型破坏特征



(d)　试验梁L1-4典型破坏特征

图 3　试验梁破坏形态及典型破坏特征

Fig. 3　Failure Forms and Typical Failure Characteristics of Test Beams

3 试验结果分析

3.1 平截面假定验证

由跨中混凝土布置的应变片可以得到试验梁控制截面处混凝土沿高度方向的应变变化情况，如图4所示。可以看出：在加载初期，试验梁截面符合平截面变化；加载至后期，各测点的实测数据逐渐离散，但基本符合平截面假定。因此可以认为，普通混凝土与再生混凝土之间有较好的相互作用，能够协同受力，共同变形。

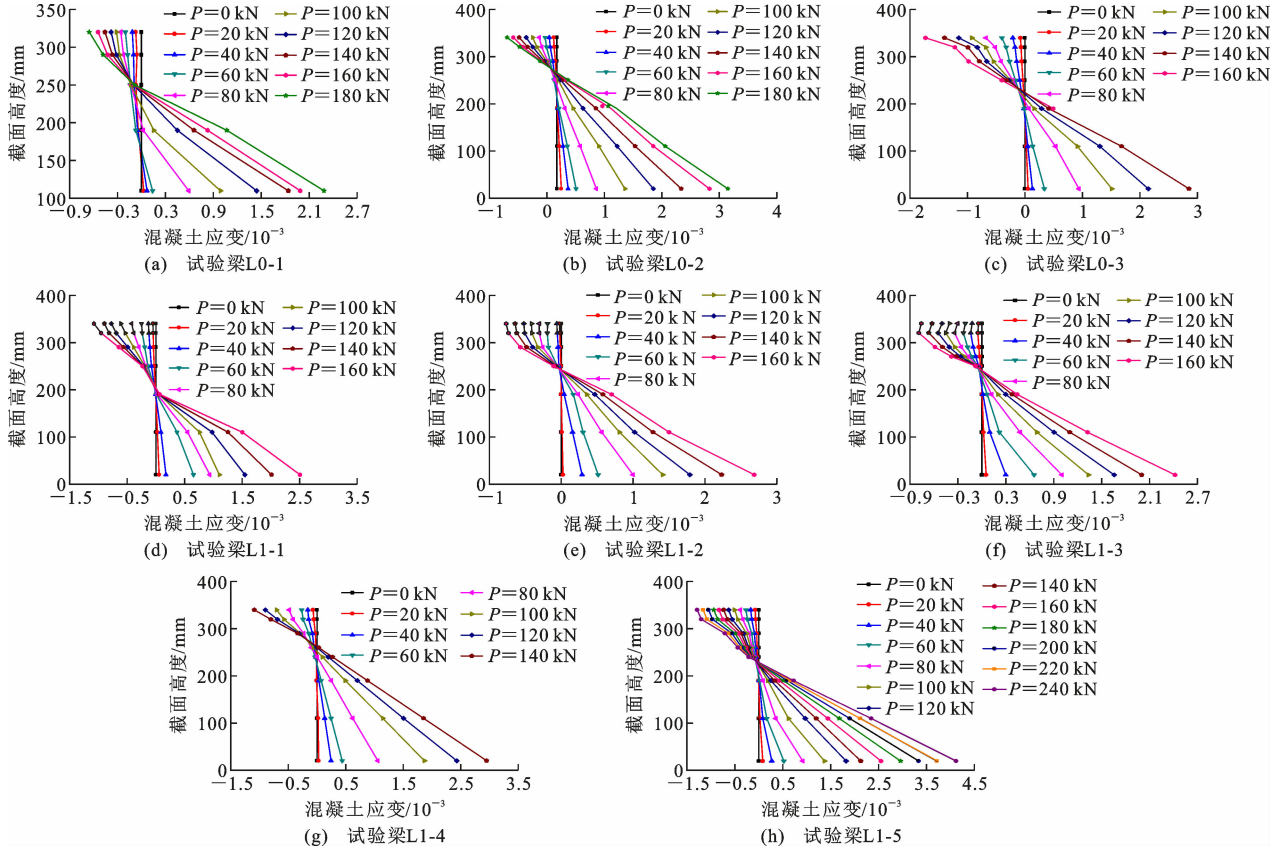


图4 试验梁跨中截面混凝土应变分布

Fig. 4 Concrete Strain Distribution in Mid-span Section of Test Beam

3.2 荷载-跨中挠度曲线

图5给出了8根试验梁的荷载-跨中挠度曲线。由图5可以看出，在配筋相同条件下，由于普通现浇混凝土强度略高于再生混凝土，试验加载时现浇再生混凝土梁比现浇普通混凝土梁挠度更大。在相同荷载下，当再生混凝土位于预制层时，跨中挠度较大；在配筋相同条件下，随着预制层高度的增加，跨中挠度变小；在预制层高度相同条件下，随着配筋率的增加，挠度变小。

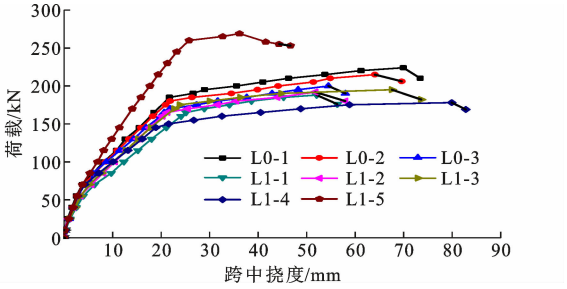


图5 试验梁荷载-跨中挠度曲线

Fig. 5 Load-mid-span Deflection Curves of Test Beams

3.3 预应力钢筋荷载-应力增量曲线

由位于预应力钢筋端部的力传感器可以测得试验过程中预应力钢筋应力变化情况，结果如图6所示。可以看出：由于采用无黏结预应力混凝土结构形式，混凝土与预应力钢筋之间没有黏结作用，因此达到承载力极限状态时，各试验梁的极限应力值均未达到其设计强度。此外，预应力钢筋的应力变化可以分为3个阶段，分界点为受拉区混凝土开裂和梁内纵向受力普通钢筋受拉屈服处。在这2个分界点处，无黏结预应力钢筋的应力曲线均出现拐点，钢筋应力增量加快，尤其是在普通钢筋屈服后，增加的荷载均由预应力钢筋承担，此时应力增量显著增大。

3.4 裂缝分布特点

图7为8根试验梁一侧裂缝分布及发展变化实

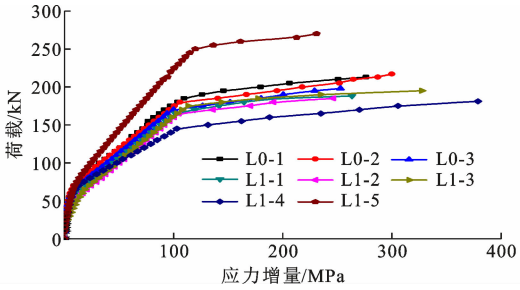


图 6　试验梁预应力钢筋的荷载-应力增量曲线

Fig. 6　Load-stress Increment Curves of Prestressed Steel Bars of Test Beams

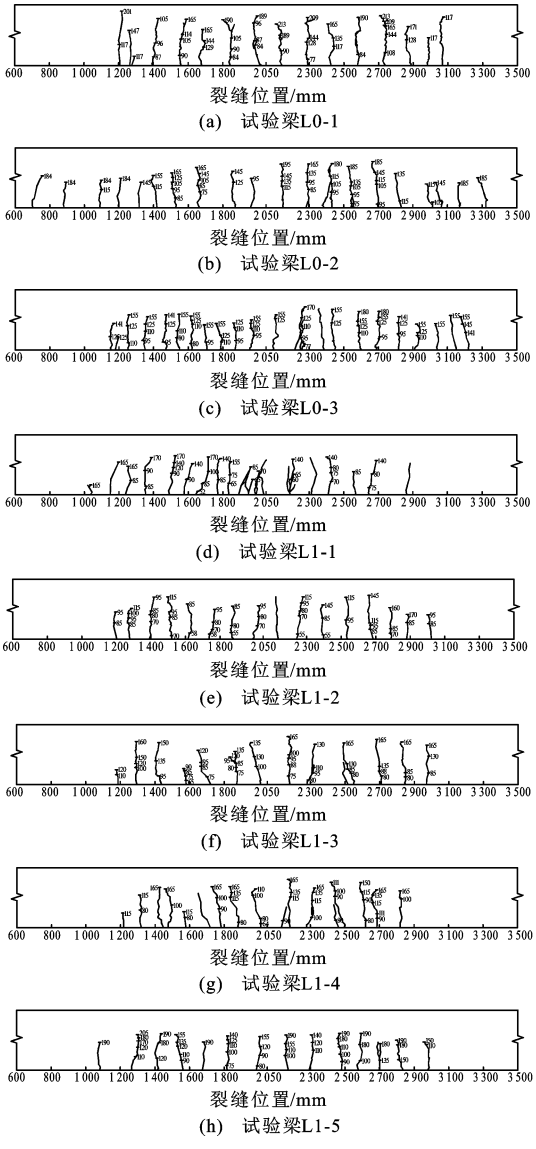


图 7　试验梁裂缝分布(单位：kN)

Fig. 7　Crack Distributions of Test Beams (Unit: kN)

测图，裂缝处数字为在该高度时的荷载等级。从图 7 可以看出：在相同配筋条件下，与现浇普通混凝土梁相比，现浇再生混凝土梁达到极限荷载时裂缝数量较多，裂缝扩展高度较小；在相同配筋条件下，当再生混凝土位于叠合层时，与普通混凝土位于叠合层相比，裂缝数量有所增加，裂缝间距相对较小；当再生混凝土位于预制层时，在相同配筋条件下，随着预制层高度的增加，平均裂缝间距逐渐增大，裂缝向上扩展高度增大；同样，当再生混凝土位于预制层时，保持预制层高度相同条件下，随着构件配筋率的增加，裂缝数量略微减少，平均裂缝间距逐渐增大，裂缝向上扩展高度逐渐减小。

3.5　弯矩特征值分析

表 6 列出了 8 根试验梁各阶段弯矩以及跨中挠度实测值。由表 6 可以看出：当预制层为普通混凝土时，试验梁的开裂弯矩有所提高，这主要是由于相对于普通混凝土，再生粗骨料与水泥砂浆之间的初始微裂缝较多，在拉应力作用下，裂缝不断形成和扩展，使拉变形很快增长，从而降低了试验梁的开裂弯矩。随着试验梁配筋率的提高，试验梁的屈服弯矩和极限弯矩显著增加。随着预制层高度的增加，试验梁的屈服弯矩和极限弯矩均增大。

4　承载力计算

由前述内容可知，平截面假定适用于无黏结预应力再生混凝土叠合梁，采用《规范》中预应力普通混凝土梁正截面受弯极限承载力 M_u 的计算公式，即

$$\alpha_1 f_c b x = \sigma_p A_p + f_y A_s \tag{1}$$

$$M_u = \sigma_p A_p \left(h_p - \frac{x}{2}\right) + f_y A_s \left(h_s - \frac{x}{2}\right) \tag{2}$$

式中：α_1 为系数，当混凝土强度等级不超过 C50 时，α_1 取为 1.0；f_y 为普通钢筋屈服强度的实际测量值；x 为混凝土受压区高度；A_s 为拉伸区域中的纵向普通钢筋的横截面面积；σ_p 为在极限承载力状态下无黏结预应力钢绞线的应力，取值见表 7；A_p 为预应力筋的截面面积；f_c 为混凝土抗压强度的实际测量值，根据表 3，普通混凝土取 41.94 MPa，再生混凝土取 33.13 MPa；b 为梁宽度；h_p 为受压区混凝土边缘至预应力筋合力作用点的距离；h_s 为从受压区混凝土边缘到拉伸区中纵向普通钢筋合力作用点的距离。

按荷载标准组合或准永久组合并考虑长期作用影响的最大裂缝宽度 ω_{max} 可按照公式(3)～(6)计算。

$$\omega_{max} = \alpha_{cr} \psi \frac{\sigma_s}{E_s} \left(1.9 c_s + 0.08 \frac{d_{eq}}{\rho_{te}}\right) \tag{3}$$

表 6 试验梁试验结果

Table 6 Test Results of Test Beams

试验梁编号	开裂弯矩 M_{cr}/(kN·m)	开裂挠度 δ_{cr}/mm	屈服弯矩 M_y/(kN·m)	屈服挠度 δ_y/mm	极限弯矩 M_u/(kN·m)	极限挠度 δ_u/mm
L0-1	50.05	4.93	117.65	20.81	145.60	69.98
L0-2	48.75	4.81	117.00	21.85	139.75	64.07
L0-3	50.05	5.89	105.95	20.30	130.00	54.48
L1-1	33.80	3.67	105.95	24.75	122.20	52.10
L1-2	35.75	3.35	107.90	21.30	124.80	51.78
L1-3	39.00	3.98	113.75	23.86	126.75	67.61
L1-4	41.60	3.59	93.60	18.75	115.70	79.92
L1-5	48.75	4.27	169.00	25.80	174.85	36.15

表 7 极限承载力状态下无黏结预应力钢绞线的应力值

Table 7 Stress Values of Unbonded Prestressed Steel Strand Under Ultimate Bearing Capacity State

试验梁编号	σ_{pe}/MPa	$\triangle\sigma_p$/MPa	σ_p/MPa
L0-1	1 023.00	276.57	1 299.57
L0-2	1 121.00	300.07	1 421.07
L0-3	956.00	253.00	1 209.00
L1-1	946.00	263.57	1 209.57
L1-2	981.00	246.43	1 227.43
L1-3	1 047.00	327.50	1 374.50
L1-4	847.00	379.00	1 226.00
L1-5	946.00	231.07	1 177.07

注：σ_{pe}为扣除相应阶段的张拉预应力损失以后预应力筋中剩余的预应力；$\triangle\sigma_p$ 为应力增量。

$$\psi=1.1-0.65\frac{f_{tk}}{\rho_{te}\sigma_s} \tag{4}$$

$$d_{eq}=\frac{\sum n_i d_i^2}{\sum n_i \nu_i d_i} \tag{5}$$

$$\rho_{te}=\frac{A_s+A_p}{A_{te}} \tag{6}$$

式中：α_{cr}为构件受力特征系数；ψ 为裂缝间纵向受拉钢筋应变不均匀系数；σ_s 为按荷载准永久组合计算的钢筋混凝土构件纵向受拉普通钢筋应力或按标准组合计算的预应力混凝土构件纵向受拉钢筋等效应力；E_s 为钢筋的弹性模量；c_s 为最外层纵向受拉钢筋外边缘至受拉区底边的距离；ρ_{te}为按有效受拉混凝土截面面积计算的纵向受拉钢筋配筋率；d_{eq}为受拉区纵向钢筋的等效直径；A_{te}为有效受拉混凝土截面面积；d_i 为受拉区第 i 种纵向钢筋的公称直径；n_i 为受拉区第 i 种纵向钢筋的根数；ν_i 为受拉区第 i 种钢筋的相对黏结特性系数。

各试验梁极限承载力的计算值与实测值对比情况见表 8。由表 8 可知：依据《规范》计算的无黏结预应力再生混凝土叠合梁的受弯承载力与实测值比值的平均值为0.964，标准差为0.051，变异系数为0.053，计算结果与试验实测结果吻合良好，说明运用《规范》中的公式进行无黏结预应力再生混凝土叠合梁构件受弯承载力计算是可行的。为指导工程应用，在实际工程计算中，为偏于安全，对公式(2)计算得到的极限承载力乘以 0.9 的折减系数。

表 8 试验梁极限承载力计算值与实测值对比

Table 8 Comparison of Calculated Values and Measured Values of Ultimate Bearing Capacity of Test Beams

试验梁编号	M_u^c/(kN·m)	M_u^t/(kN·m)	M_u^c/M_u^t
L0-1	133.43	145.60	0.92
L0-2	125.48	139.75	0.90
L0-3	127.62	130.00	0.98
L1-1	127.80	122.20	1.05
L1-2	127.19	124.80	1.02
L1-3	126.21	126.75	1.00
L1-4	107.20	115.70	0.93
L1-5	161.68	174.85	0.92

注：M_u^c 为极限承载力计算值；M_u^t 为极限承载力实测值。

5 结 语

(1)当再生混凝土应用于预应力叠合受弯构件时，跨中截面高度的应变变化规律与截面平截面假定一致，普通混凝土与再生混凝土之间有较好的相互作用，能够协同受力，共同变形。

(2)无黏结预应力钢绞线的应力增量曲线为三折线。当再生混凝土位于预制层时，在配筋相同条件下，预制层高度增加会延缓梁内纵向受力普通钢筋受拉屈服。相同预制层高度时，提高纵向钢筋强度，会有效提高梁的性能。

(3)与普通混凝土梁相比，再生混凝土梁裂缝数量相对较多，达到极限荷载时裂缝扩展高度相对较小；再生混凝土位于叠合层时，裂缝数量有所增加，裂缝间距相对较小；随着预制层高度和构件配筋率的增加，试验梁平均裂缝间距逐渐增大。

(4)基于试验数据，对承载力极限状态下无黏结

预应力再生混凝土叠合梁承载力进行验证，计算值与实测值吻合较好。

参考文献：

References：

[1] 周中一，曹万林，董宏英，等. 高强再生混凝土 T 形截面梁受弯性能[J]. 北京工业大学学报，2015，41(6)：866-872.
ZHOU Zhong-yi，CAO Wan-lin，DONG Hong-ying，et al. Flexural Performance of High Strength RAC T-shape Beam[J]. Journal of Beijing University of Technology，2015，41(6)：866-872.

[2] 刘　超，白国良，张　玉，等. 基于荷载长期效应再生混凝土梁受弯性能试验及刚度计算方法[J]. 建筑结构学报，2016，37(增 2)：1-8.
LIU Chao，BAI Guo-liang，ZHANG Yu，et al. Study on Stiffness Calculation Method and Flexural Performance of Recycled Concrete Beam Based on Long-term Loading Effect[J]. Journal of Building Structures，2016，37(S2)：1-8.

[3] 董江峰，袁书成，王清远，等. CFRP 加固钢筋再生混凝土梁的弯曲性能研究[J]. 建筑结构学报，2019，40(6)：71-78.
DONG Jiang-feng，YUAN Shu-cheng，WANG Qing-yuan，et al. Flexural Behavior of RC Beams Made with Recycled Aggregate Concrete and Strengthened by CFRP Sheets[J]. Journal of Building Structures，2019，40(6)：71-78.

[4] 邓志恒，李作华，杨海峰，等. 再生混凝土压-剪复合受力性能研究[J]. 建筑结构学报，2019，40(5)：174-180.
DENG Zhi-heng，LI Zuo-hua，YANG Hai-feng，et al. Mechanic Behavior of Recycled Aggregate Concrete Subjected to Compression-shear Loading[J]. Journal of Building Structures，2019，40(5)：174-180.

[5] 张　毅，赵胜华，陈　杏. 再生混凝土 T 形截面叠合梁受弯性能试验研究[J]. 工业建筑，2014，44(5)：47-50，84.
ZHANG Yi，ZHAO Sheng-hua，CHEN Xing. Experimental Research on the Flexural Behavior of Recycled Concrete T-shaped Cross-section Superposed Beams[J]. Industrial Construction，2014，44(5)：47-50，84.

[6] 混凝土结构设计规范：GB 50010—2010[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2011.
Code for Design of Concrete Structures：GB 50010—2010[S]. Beijing：China Architecture & Building Press，2011.

[7] 曹万林，巩晓雪，叶涛萍，等. 不同再生骨料取代率的再生混凝土梁受弯性能试验研究[J]. 自然灾害学报，2017，26(4)：10-18.
CAO Wan-lin，GONG Xiao-xue，YE Tao-ping，et al. Experiment of the Flexural Performance of Recycled Concrete Beams with Different Recycled Aggregate Replacement Ratios[J]. Journal of Natural Disasters，2017，26(4)：10-18.

[8] AREZOUMANDI M，SMITH A，VOLZ J S，et al. An Experimental Study on Flexural Strength of Reinforced Concrete Beams with 100% Recycled Concrete Aggregate[J]. Engineering Structures，2015，88：154-162.

[9] KNAACK A M，KURAMA Y C. Behavior of Reinforced Concrete Beams with Recycled Concrete Coarse Aggregates[J]. Journal of Structural Engineering，2015，141(3)：B4014009.

[10] 肖建庄，徐亚玲，王璞瑾. 再生混凝土叠合梁抗剪性能试验[J]. 混凝土，2012(5)：118-122.
XIAO Jian-zhuang，XU Ya-ling，WANG Pu-jin. Test on the Shear Behavior of Recycled Concrete Composite Beams[J]. Concrete，2012(5)：118-122.

[11] 陈宗平，周春恒，梁　莹，等. 高温后钢筋再生混凝土梁受力性能试验及承载力计算[J]. 建筑结构学报，2017，38(4)：98-108.
CHEN Zong-ping，ZHOU Chun-heng，LIANG Ying，et al. Mechanical Behavior and Calculation on Bearing Capacity of Reinforced Recycled Aggregate Concrete Beam After Elevated Temperature[J]. Journal of Building Structures，2017，38(4)：98-108.

[12] SEARA-PAZ S，GONZALEZ-FONTEBOA B，MARTINEZ-ABELLA F，et al. Flexural Performance of Reinforced Concrete Beams Made with Recycled Concrete Coarse Aggregate[J]. Engineering Structures，2018，156：32-45.

[13] 肖建庄，朱永明，王璞瑾，等. 再生混凝土 U 型叠合梁抗剪性能[J]. 建筑科学与工程学报，2012，29(2)：1-6.
XIAO Jian-zhuang，ZHU Yong-ming，WANG Pu-jin，et al. Shear Behavior of Recycled Concrete U-shaped Composite Beams[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering，2012，29(2)：1-6.

[14] 陈爱玖，王　璇，解　伟，等. 再生混凝土梁受弯性能试验研究[J]. 建筑材料学报，2015，18(4)：589-595.
CHEN Ai-jiu，WANG Xuan，XIE Wei，et al. Experimental Research on Flexural Property of Recycled Concrete Beam[J]. Journal of Building Materials，2015，18(4)：589-595.

[15] 汤　强. 不同再生粗骨料掺配量对再生混凝土强度的

影响试验分析[J]. 科学技术创新,2021(21):145-147.
TANG Qiang. Experimental Analysis of the Influence of Different Recycled Coarse Aggregates on the Strength of Recycled Concrete [J]. Scientific and Technological Innovation,2021(21):145-147.

[16] 陈爱玖,韩小燕,杨 粉,等. 预应力碳纤维布加固钢筋再生混凝土梁受弯承载力研究[J]. 土木工程学报,2018,51(11):104-112.
CHEN Ai-jiu, HAN Xiao-yan, YANG Fen, et al. Study on Flexural Capacity of Reinforced Recycled Concrete Beams Strengthened with Prestressed CFRP Sheets [J]. China Civil Engineering Journal, 2018, 51(11):104-112.

[17] 赵志青,余振鹏,孙 雪,等. 不同取代率再生混凝土基本力学性能试验研究[J]. 混凝土,2019(3):86-89,93.
ZHAO Zhi-qing,YU Zhen-peng,SUN Xue,et al. Experimental Study on Basic Mechanical Properties of Recycled Aggregate Concrete with Different Substitution Rate[J]. Concrete,2019(3):86-89,93.

[18] 冯庆兴,徐铮弢,徐宏广,等. 带缺陷钢筋混凝土叠合梁斜截面抗剪性能试验研究[J]. 建筑结构,2021,51(11):88-93.
FENG Qing-xing, XU Zheng-tao, XU Hong-guang, et al. Experimental Study on Shear Resistance of Oblique Section of Reinforced Concrete Composite Beams with Defects[J]. Building Structure,2021,51(11):88-93.

[19] 过民龙,徐其功,李 娜,等. 装配式混凝土凹口叠合梁静力性能试验研究[J]. 建筑结构,2020,50(S1):591-596.
GUO Min-long,XU Qi-gong,LI Na,et al. Experimental Study on Static Performance of Grooved Concrete Composite Beams in Assembly Buildings[J]. Building Structure,2020,50(S1):591-596.

[20] ZHANG K J,XIAO J Z. Time-dependent Reliability Analysis of Recycled Aggregate Concrete Beams[J]. Journal of Building Engineering,2021,43:102659.

[21] 徐萌波,王社良,张明明. 再生混凝土力学性能试验研究[J]. 混凝土,2018(7):72-75.
XU Meng-bo, WANG She-liang, ZHANG Ming-ming. Experimental Study on Mechanical Properties of Recycled Concrete[J]. Concrete,2018(7):72-75.

[22] 李 辉. 预应力型钢混凝土叠合梁受力性能和设计方法研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2021.
LI Hui. Study on Mechanical Performance and Design Method of Prestressed Steel Reinforced Concrete Laminated Beams[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology,2021.

[23] 刘云峰. 预应力自密实再生混凝土梁受弯性能试验研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2019.
LIU Yun-feng. Experimental Study on Flexural Behavior of Prestressed Self-compacting Recycled Concrete Beams [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology,2019.

[24] 胡曼鑫. 预应力钢筋混凝土叠合梁受弯性能试验研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2021.
HU Man-xin. Experimental Study on Bending Performance of Prestressed Reinforced Concrete Composite Beam[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology,2021.

[25] 张士保,曹 霞,张金丹,等. RPC 叠合梁受弯性能试验研究[J]. 广西大学学报(自然科学版),2019,44(1):52-59.
ZHANG Shi-bao, CAO Xia, ZHANG Jin-dan, et al. Bending Performance Test of RPC Composite Beams [J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition),2019,44(1):52-59.

[26] 刘 超,朱 超,樊金承,等. 再生混凝土梁长期加载与卸载后受弯性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2020,41(12):56-63.
LIU Chao,ZHU Chao,FAN Jin-cheng,et al. Experimental Study on Recycled Concrete Beam Subjected to Long-term Loading and Its Flexural Performance After Unloading [J]. Journal of Building Structures, 2020,41(12):56-63.