Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/eng

Research
Civil Engineering—Article

再生与原生混凝土结构构件统一设计理论的基础问题

肖建庄[a,b,*]，张凯建[c,a]，丁陶[a]，张青天[c,a]，肖绪文[a]

[a] *Department of Structural Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China*
[b] *College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, China*
[c] *College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China*

ARTICLE INFO

Article history:
Received 15 July 2022
Revised 10 October 2022
Accepted 21 March 2023
Available online 20 June 2023

关键词
再生混凝土
原生混凝土
强度取值
本构关系
可靠度
统一设计方法

摘要

再生混凝土作为一种低碳混凝土，成为近二十年来国内外的研究热点，但是目前再生混凝土结构的设计仍是一个挑战。本文从原生与再生混凝土结构构件统一设计的新需求出发，剖析了两者统一设计的必要性，并从强度取值、受压本构关系以及结构构件设计方法等方面进行了深入论证。分析发现，再生混凝土的强度变异系数总体上高于原生混凝土，再生混凝土的抗压强度及抗拉强度代表值的定义和取值方法与原生混凝土一致；原生与再生混凝土的单轴受压本构关系具有统一的数学表达形式，但与原生混凝土相比，再生混凝土弹性模量降低、脆性增加。最后，提出了再生混凝土构件安全可靠度调整系数，实现了再生与原生混凝土构件承载力设计公式的统一，并从概念设计和构造措施上，论证了考虑时变强度与钢筋锈蚀等影响的时变可靠度统一的可行性。本文的工作丰富和发展了混凝土结构基本理论。

© 2023 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

1. 引言

由于天然矿山和河砂的资源有限，天然骨料的供应逐渐不能满足建筑需求[1]。此外，近年来，建筑和拆迁垃圾的年产量明显增加，亟需提高资源利用率。因此，促进再生混凝土（RAC）的应用是必要的。此前，再生混凝土主要用于路面基座、地面垫层和围护结构，附加值低。随着越来越多旧的建筑被拆除，应用再生混凝土结构来逐步取代部分原生混凝土（NAC）结构是未来的重要发展趋势，符合循环经济和低碳战略的要求。

再生混凝土是指将废弃混凝土经破碎工艺后，按一定级配混合形成再生骨料，部分（15%以上）或全部代替砂石等天然骨料配制而成的混凝土[2]。再生混凝土技术可实现对废混凝土的再利用，形成新的结构材料，减少环境污染，节省建设成本，能逐步部分替代原生混凝土作为基础设施建设的材料，且其经济性随骨料取代率的增加提升明显[3]。现阶段资源化生产线制备的再生原料包括再生粗骨料、再生细骨料以及再生粉料[4]。现有混凝土工程中应用的多为再生粗骨料[5]，再生粗骨料取代率范围一般为30%~50%，仅在性能要求较低的部位中达到100%。

值得注意的是，废弃混凝土的来源和成分较为复杂，再生混凝土性能的变异性与原生混凝土不同。再生混凝土的性能受再生骨料来源、品质、级配及取代率等因素影响[6–7]，由于再生骨料性能的劣化，再生混凝土性能会产

* Corresponding author.
E-mail address: jzx@tongji.edu.cn (J. Xiao).

2095-8099/© 2023 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).
英文原文：Engineering 2023, 29(10): 188–197
引用本文：Jianzhuang Xiao, Kaijian Zhang, Tao Ding, Qingtian Zhang, Xuwen Xiao. Fundamental Issues Towards Unified Design Theory of Recycled and Natural Aggregate Concrete Components. *Engineering*, https://doi.org/10.1016/j.eng.2023.03.017

生劣化。相同水胶比下，随着再生粗骨料取代率增加，混凝土的抗压强度降低，当100%取代时，强度降低约20%[8]。由于再生骨料是废弃混凝土块经过破碎、清洗与分级后的产物，其来源和加工过程中均会积累损伤，因此其是天然骨料和附着老砂浆组成的多相材料[9]。与天然骨料相比，其具有更高的吸水率和压碎指标[10–11]。目前，针对再生骨料性能的提升，可通过物理手段减少表面旧砂浆含量，包括“研磨”方法[12–13]、骨料颗粒整形工艺等[14]，也可通过化学、生物等方式增强或剥离表面旧砂浆，包括纳米改性方法、微生物矿化沉积方法，以降低再生混凝土的变异性。然而，这些方法目前还不能广泛地应用并消除其变异性。因此，可靠度分析非常重要，它将影响再生混凝土结构的设计。

由于再生混凝土性能的劣化，与原生混凝土结构相比，再生混凝土结构在短期及长期作用下结构行为规律存在差异。再生混凝土本构关系研究表明[15–16]，在受压、受拉等工况下，高取代率下的再生混凝土本构关系曲线与原生混凝土存在较大差异，受压情况下，再生混凝土的峰值应变要大。对于构件来说，现有研究对于单掺再生粗骨料混凝土较为全面，包括粗骨料取代率影响、静力以及地震作用引起的响应等。研究发现，钢筋再生混凝土构件的受力性能、抗震性能等较同配筋的钢筋原生混凝土构件均有不同程度的退化[17]，但可通过合理设计实现其与原生混凝土相当甚至更好的性能，可用于实际工程中[18]。然而，使用再生细骨料的混凝土构件，其抗剪性能明显低于原生混凝土，100%取代率下抗剪承载力降低6%~30%。在相同轴压比下，再生细骨料混凝土柱的承载力较低，延性较原生混凝土构件低。但再生混凝土在阻尼特性和耐高温性能上，比同水胶比的原生混凝土要优越[19–20]。与原生混凝土相比，再生混凝土构件和结构的长期性能表现较差，但也可以通过适当的措施进行改善。

研究人员已在再生混凝土结构的变异性和可靠度分析方面开展了许多工作。Pacheco和de Brito [21]以及Pacheco等[22]发现，对再生混凝土在实际工程中的应用存在疑虑的主要原因之一是，再生骨料的变异性会增加混凝土结构性能的不确定性，因此，再生混凝土的结构可靠度设计是再生混凝土研究的新趋势。确定再生混凝土的设计参数非常重要，Silva等[23]提出了再生混凝土的弹性模量和抗压强度之间的关系，合理反映了再生混凝土弹性模量损失与再生骨料的品质及取代率之间的关系。在再生混凝土结构的设计中，Breccolotti和Materazzi [24]以及Pacheco等[25]研究了钢筋和再生混凝土之间黏结性能的可靠度，并提出了合理的分项系数，使设计的钢筋和再生混凝土黏结长度的失败概率等同于原生混凝土的设计。在构件方面，Breccolotti和Materazzi [26]研究了再生混凝土柱构件的可靠度；Silva和de Brito [27]提出了钢筋再生混凝土板的设计方法。包括本文作者在内的研究人员分析了再生混凝土梁的抗弯性能的可靠度，同时，近几年逐渐开始研究抗剪性能的可靠度。Pacheco等[22]、Ju等[28]以及Sunayana和Barai [29]建立了含与不含抗剪钢筋的再生混凝土梁的数据库，并根据可靠度分析提出了安全系数或分项系数。对于再生混凝土构件的耐久性，Albuquerque等[30]和Faleschini等[31]基于可靠度分析，研究了再生混凝土在碳化作用下的性能，并通过与原生混凝土的比较，推荐了再生混凝土的保护层厚度最佳取值。Dehvari等[32]基于可靠度分析了再生混凝土构件的设计优化，提出了氯离子环境下再生混凝土的极限取代率。Cao等[33]和Li等[34]也基于可靠度分析研究了再生混凝土的抗硫酸盐侵蚀能力。

由于再生骨料的初始缺陷、原料来源、取代率等影响，再生混凝土材料强度及其变异性与原生混凝土产生了区别，若完全沿用原生混凝土结构设计方法，则会导致结构设计计算不准确，甚至产生安全性、适用性等问题。再生混凝土是原生混凝土的一种拓展，将其结构设计理论与原生混凝土统一能够加深对再生混凝土差异性根源的理解。同时，为促进工程应用，其设计方法、设计软件等也宜与现有原生混凝土结构形成统一，为设计和施工人员提供方便。因此，再生混凝土与原生混凝土结构设计方法的统一具有重要的理论与工程意义。

在此背景下，本文主要介绍了笔者所在研究小组在再生混凝土和原生混凝土统一设计理论方面的工作，旨在提供一种可能广泛适用的分析方法。文中主要阐述了基于时不变可靠度的结构抗力分析的统一方法；初步讨论了考虑时变可靠度的分析方法。再生混凝土和原生混凝土构件统一设计理论的发展，不仅具有工程应用意义，还可以补充和扩展原生混凝土结构的设计理论。

2. 再生混凝土强度取值

2.1. 抗压强度代表值

2.1.1. 抗压强度变异系数

再生混凝土强度与构件抗力直接相关，在没有大量构件试验结果的情况下，对再生混凝土强度进行统计，是确定构件抗力统计参数的一个可行的方法。当再生混凝土水灰比与原生混凝土相同时，其强度均值要低[35–39]，这主要是由于再生混凝土存在更多的界面过渡区，破坏过程

与原生混凝土不同[37]。根据文献[9,24,26,39–41]中的报道，图1为不同取代率下再生混凝土的抗压强度和抗压强度变异系数，图中给出了再生和原生混凝土的强度比及其变异系数。上述数据收集自不同的国家和地区，包括中国、西班牙、葡萄牙和意大利，由图中数据可知，再生骨料的性能是不尽相同的。

再生与原生混凝土的强度比随着取代率的增加而降低[图1（a）]，变异系数与取代率之间的关系也呈现出增加的趋势[图1（b）]。从趋势线来看，当再生粗骨料的取代率为100%时，再生混凝土的抗压强度下降约10.0%，抗压强度变异系数增加约20.0%。

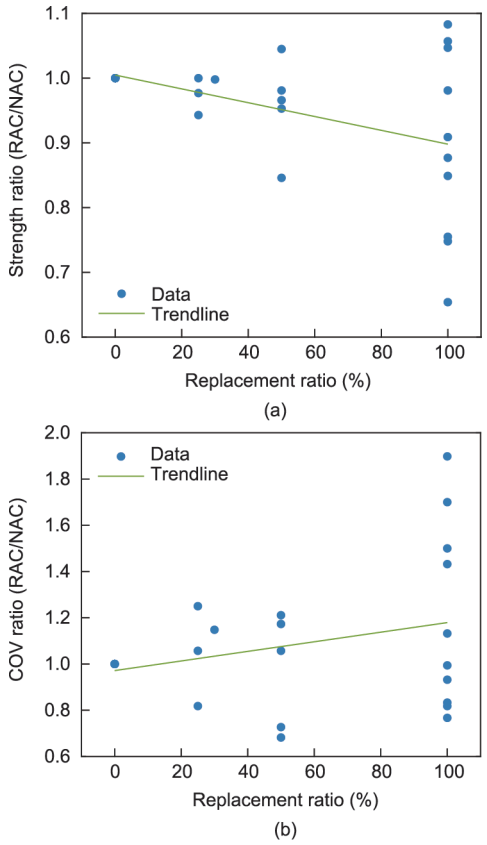

图1. 再生骨料取代率与再生和原生混凝土抗压强度比值（a）及再生和原生混凝土抗压强度变异系数比值（b）的关系。

2.1.2. 抗压强度取值

再生混凝土的强度取值应满足现行标准中材料性能标准值及相应材料分项系数的要求，以保证原生与再生混凝土结构的可靠性达到相同的水平。对于原生混凝土，我国《混凝土结构设计规范》（GB50010—2010） [42]规定了其抗压强度取值，包括平均值、标准值、设计值。同时，对强度值之间的函数关系进行了规定。原生混凝土标准值具有95%保证率，混凝土轴心抗压强度设计值等于标准值与材料分项系数的比值，材料分项系数由工程经验和可靠度分析得到，原生混凝土材料分项系数取值为1.4。

在强度值之间的函数关系方面，Xiao [43]进行过相应的研究，结果表明再生混凝土棱柱体抗压强度与立方体抗压强度的比值要高于原生混凝土，这一比值约提高8%。一般情况下，再生混凝土的换算关系可与原生混凝土相同。

从原生与再生混凝土强度取值的统一角度出发，再生混凝土的强度标准值和设计值定义应与原生混凝土一致，取值的过程中，应充分考虑再生混凝土强度的变异性。例如，配合比设计中标准差取值可为6 MPa（原生混凝土为5 MPa）、材料分项系数的取值应高于原生混凝土（原生混凝土为1.4）。

2.2. 抗拉强度代表值

2.2.1. 抗拉强度变异系数

图2总结了在不同国家使用的再生混凝土的抗拉强度[24,40]。趋势线表明，再生混凝土抗拉强度的平均值随着再生骨料的取代率而下降，而强度的变异系数则呈现上升趋势。与再生混凝土的抗压强度相比，抗拉强度的测试数量相对较少，主要是因为抗拉强度测试相对较难进行。

2.2.2. 抗拉强度取值

再生混凝土的抗拉强度与抗压强度相似，包括平均强度、标准强度和设计强度，这些强度值符合《混凝土结构设计规范》 [42]关于原生混凝土的规定。还应考虑再生混凝土抗拉强度的变异系数，需要相应地增加标准偏差和安全分项系数，以保证强度取值的合理性。

再生骨料的复杂来源会使再生混凝土强度变异性提高，进而导致再生混凝土构件承载力的变异系数增大，降低再生混凝土构件的可靠度。再生混凝土构件采用与原生混凝土类似的理论公式进行设计是合理的，一方面，再生混凝土构件的力学行为和破坏机理与原生混凝土相近；另一方面便于再生混凝土结构的设计、施工和应用，可以推进再生混凝土结构与原生混凝土结构设计的统一。因此，基于可靠度理论对再生混凝土的强度取值进行定量确定，进而通过修正原生混凝土设计公式对再生混凝土构件进行设计，最终保证再生混凝土构件可靠度满足要求。

3. 再生混凝土单轴受压随机本构

3.1. 试验方法

3.1.1. 试件设计与加载方法

再生混凝土应力-应变曲线测试用试件为标准棱柱体

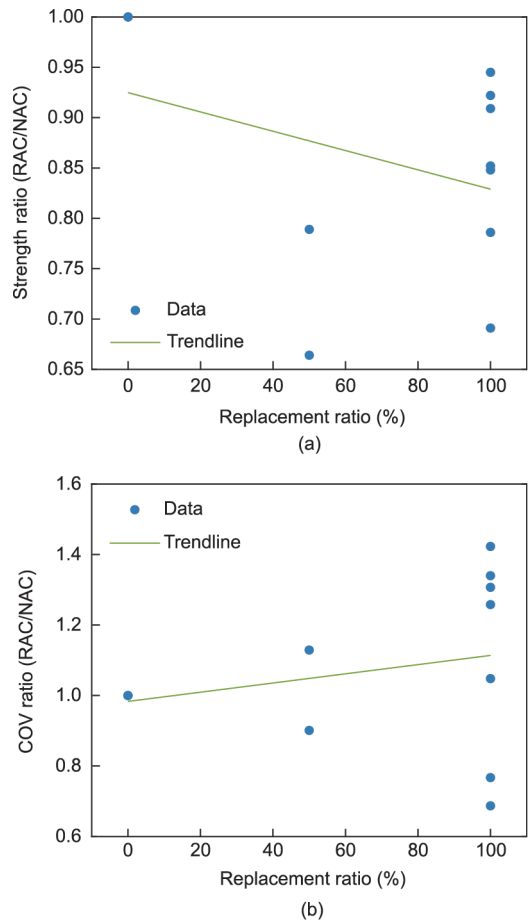

图2. 再生骨料取代率与再生和原生混凝土抗拉强度比值（a）及再生和原生混凝土抗拉强度变异系数比值（b）的关系。

（150 mm×150 mm×300 mm），加载装置如图3所示。加载应变率为10^{-5} s^{-1}，可视为准静态加载。

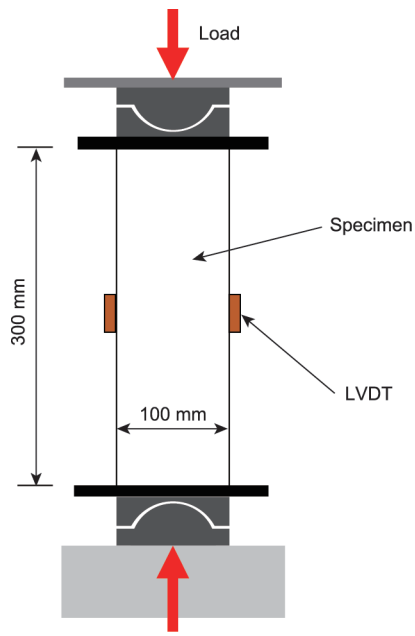

图3. 混凝土试件加载装置。LVDT：线性可变差动变压器。

3.1.2. 试验应力-应变曲线

计算了不同取代率的应力-应变曲线的平均值和变异系数。相应的应变为0~0.007，如图4所示。

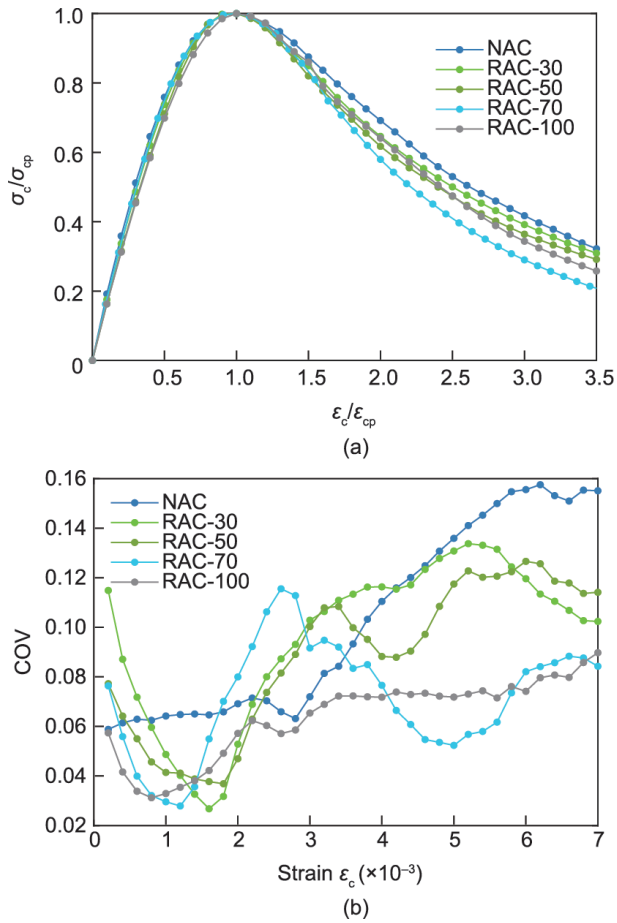

图4. 不同系列混凝土的应力-应变曲线平均值及变异系数。（a）归一化应力-应变曲线平均值；（b）应力变异系数随应变变化情况。σ_c：应力；ε_c：应变；σ_{cp}：峰值应力；ε_{cp}：峰值应变。RAC后面的数字（30、50、70、100）表示RAC的补偿比率百分比。

由图4（a）可知，再生混凝土的应力-应变曲线的下降段要陡于原生混凝土，表明再生混凝土的脆性增加。由图4（b）可知，对于原生混凝土，当应变小于0.0055时，应力变异系数随应变整体呈增加趋势；对于再生混凝土，当应变小于0.001时，应力变异系数随应变增加而降低，随后增加。然而，70%取代率的再生混凝土试件的规律性不明显。

3.2. 单轴受压随机本构模型

3.2.1. 特征指标之间的函数关系

峰值应力[σ_{cp} (MPa)]和峰值应变[ε_{cp} ($\times10^{-3}$)]之间的关系，弹性模量[E_c ($\times10^4$ MPa)]和标准立方体抗压强度[$f_{cu,k}$ (MPa)]之间的关系，以及峰值应力和形状系数（α_c）之间

的关系，可以由式（1）至式（3）确定，见《混凝土结构设计规范》[42]：

$$\varepsilon_{cp}=a_1\cdot\sqrt{\sigma_{cp}}+b_1 \tag{1}$$

$$E_c=\frac{10}{a_2+\dfrac{b_2}{f_{cu,k}}} \tag{2}$$

$$\alpha_c=a_3\cdot\sigma_{cp}^{0.785}-b_3 \tag{3}$$

式中，a_1、b_1、a_2、b_2、a_3和b_3是常系数，对于原生混凝土，它们的取值分别为0.7、0.172、2.2、34.7、0.157和0.905。

形状系数α_c可用公式（4）来确定，它与极限应变（ε_{cu}）和峰值应变（ε_{cp}）的比值（η）有关，ε_{cu}为应力下降到$0.85\sigma_{cp}$时的相应应变：

$$\alpha_c=\frac{\dfrac{\eta}{0.85}-\eta}{(\eta-1)^2} \tag{4}$$

图5至图7给出了特征点之间的关系，图中，试验结果按照试块龄期分为三部分，再生混凝土的修正关系是根据笔者的测试结果和文献中的实验数据得到的。共计115个试样，包括棱柱和圆柱体，试验数据来自不同的国家（中国、西班牙、巴西和意大利）。由于再生骨料的来源多种多样，包括机场跑道、结构混凝土的拆除固废、混凝土试验后试件等，因此再生骨料的物理性能变化较大，如吸水率（3.20%~9.25%）、表观密度（2381~2525 kg·m^{-3}）和压碎指标（15.2%~19.5%）。

峰值应力与峰值应变、峰值应力与弹性模量、峰值应力与形状系数之间拟合关系的决定系数R^2值分别为0.58、0.59和0.29，表明再生混凝土力学性能的变异性是不能忽视的。因此，应根据现有模型和收集的试验数据对再生混凝土的应力-应变关系进行修改，同时需要进一步的相关研究来评估变异性和应力-应变关系模型。

通过拟合曲线，发现混凝土龄期对再生混凝土的弹性

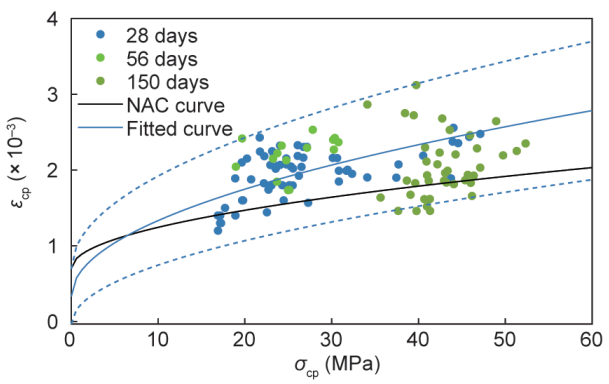

图5. 峰值应力与峰值应变之间的拟合关系。虚线表示95%的置信区间[16]。

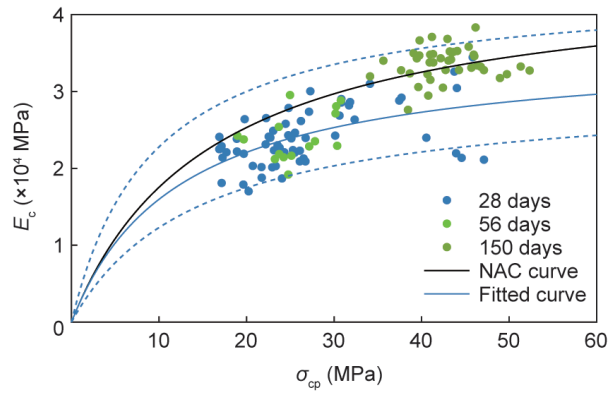

图6. 峰值应力与弹性模量之间的拟合关系。虚线表示95%的置信区间[16]。

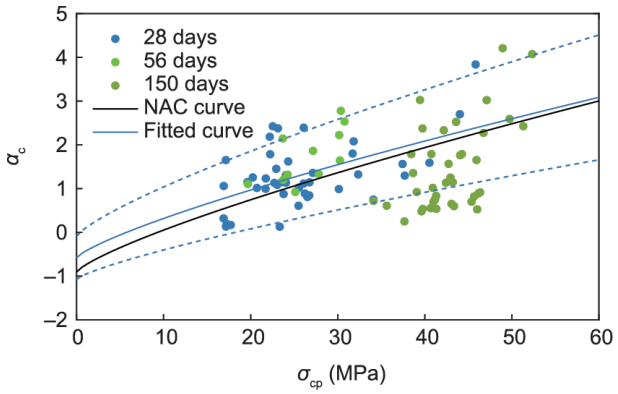

图7. 峰值应力与形状系数α_c之间的拟合关系。虚线表示95%的置信区间[16]。

模量影响很大，而对峰值应变的影响较小。这是由于随着混凝土龄期的增长，水泥继续水化，提高了再生混凝土的强度和弹性模量，进而使得混凝土的峰值应变受混凝土龄期的影响较小。当再生混凝土与原生混凝土的强度相同时，再生混凝土的峰值应变要大于原生混凝土，而再生混凝土的弹性模量要小于原生混凝土；再生混凝土的下降段形状系数要大于原生混凝土。

3.2.2. 修正模型

基于上文所建立的特征点之间的关系：如式（1）至式（3）所示，对《混凝土结构设计规范》中的模型进行修正得到再生混凝土本构模型。图8给出了不同强度等级下的再生混凝土应力-应变曲线与原生混凝土的对比。由图8（a）可知，对于再生混凝土和原生混凝土，随着强度的增高，再生混凝土峰值应变和弹性模量增大，曲线的下降段变陡。与原生混凝土相比，当强度从20 MPa增大到45 MPa时，再生混凝土的下降段范围更大，曲率更大，表明再生混凝土的脆性增加，归一化后的应力-应变曲线如图8（b）所示，可以更明显地看出再生混凝土脆性增加。当峰值应力为40 MPa时，再生混凝土的峰值应变为

0.0022，与原生混凝土相比增加约23%；再生混凝土弹性模量为27 110 MPa，与原生混凝土相比降低17%；下降段形状系数为2.489，而原生混凝土为1.936。

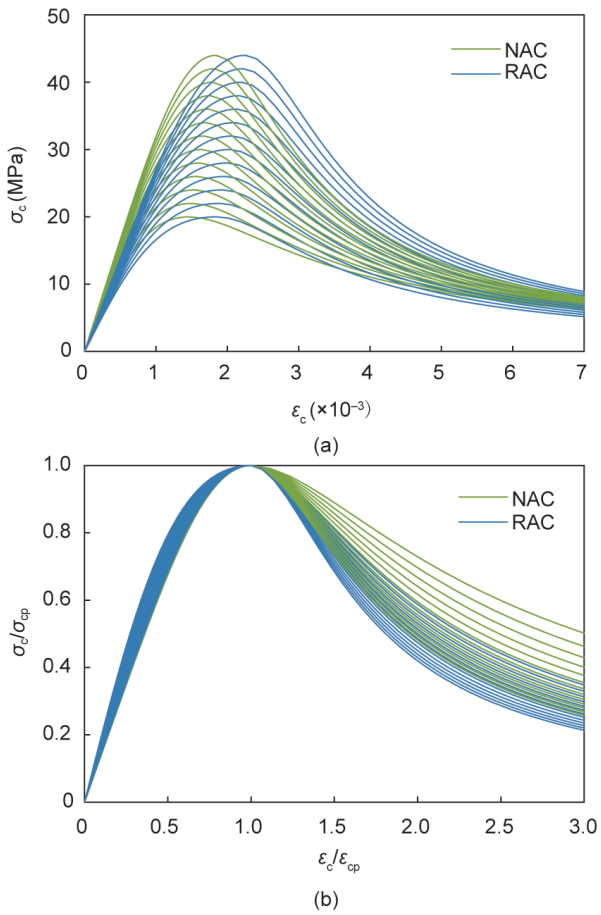

图8. 不同强度等级下再生混凝土与原生混凝土应力-应变曲线对比。（a）不同强度等级下的应力-应变曲线；（b）不同强度等级下的归一化应力-应变曲线。

再生混凝土的单轴受压本构模型与原生混凝土具有相似的数学表达形式，如式（5）所示，含义和表达式都是相同的，其中，参数$\rho_c=\frac{\sigma_{cp}}{E_c\varepsilon_{cp}}$，参数$m=\frac{E_c\varepsilon_{cp}}{E_c\varepsilon_{cp}-\sigma_{cp}}$，$d_c$为损伤因子[式（6）]。不同的是，在建立再生混凝土的模型中，基于试验数据给出了特征点之间的关系，同时对应力进行了分布检验，在给定应变处，对应的应力服从正态分布。

$$\sigma_c=(1-d_c)E_c\varepsilon_c \tag{5}$$

$$d_c=\begin{cases}1-\dfrac{\rho_c m}{m-1+\eta^m} & 0\le\eta<1\\ 1-\dfrac{\rho_c}{\alpha_c(\eta-1)^2+\eta} & \eta>1\end{cases} \tag{6}$$

式中，α_c为下降段形状系数，由式（7）确定：

$$\alpha_c=0.151\sigma_{cp}^{0.785}+0.182 \tag{7}$$

4. 基于可靠度的再生混凝土梁承载能力设计方法

4.1. 再生混凝土材料分项系数

4.1.1. 计算过程

以再生混凝土受弯梁为研究对象，考虑的因素有：荷载类型（恒荷载和活荷载），恒载和活载的荷载标准值比值（0.25、0.50、1.0、1.50和2.0），混凝土等级（C30和C40），屈服强度为335 MPa和400 MPa的钢材等级[热轧带肋钢筋（HRB），HRB335和HRB400]，4个配筋率（ρ）。

以原生混凝土梁为参照，分别保持原生与再生混凝土的抗压强度标准值、均值、设计值相同，对再生混凝土的材料分项系数进行计算，再生混凝土的强度变异系数取为8.0%~20.0%。

4.1.2. 材料分项系数取值

当原生与再生强度标准值相同时，计算了C30和C40再生混凝土的材料分项系数。将计算结果按配筋率不同分为4组，并给出了具有95%保证率的曲线，如图9所示。

由图9可知，当强度标准值相同时，随再生混凝土抗压强度变异系数增加，再生混凝土材料分项系数降低。这是由于在标准值相同的条件下，再生混凝土的抗压强度变异系数越大，其强度平均值越大，强度平均值的提高可提高再生混凝土梁的可靠指标。当再生混凝土的强度变异系数大于原生混凝土强度变异系数（C30为0.13，C40为0.10）时，再生混凝土梁在最大配筋率时，其材料分项系数计算值最大。强度标准值相同的情况下，在原生混凝土强度变异系数的基础上，将其提高10%确定为再生混凝土抗压强度变异系数，在95%保证率下，C30、C40再生混凝土的分项系数可取为1.45。其他强度等级下的再生混凝土材料分项系数可按照相同的方法进行确定。

综合提高再生混凝土梁可靠度的方法：强度均值相同的情况下，通过提高配筋率来提高再生混凝土梁的可靠度，对再生混凝土的试配强度要求较低；强度标准值相同的情况下，在变异系数较小时，需要提高配筋来提高可靠度。强度设计值相同的情况下，需要提高再生混凝土的试配强度，如通过控制再生骨料的质量，优化再生混凝土配合比设计等方式实现。

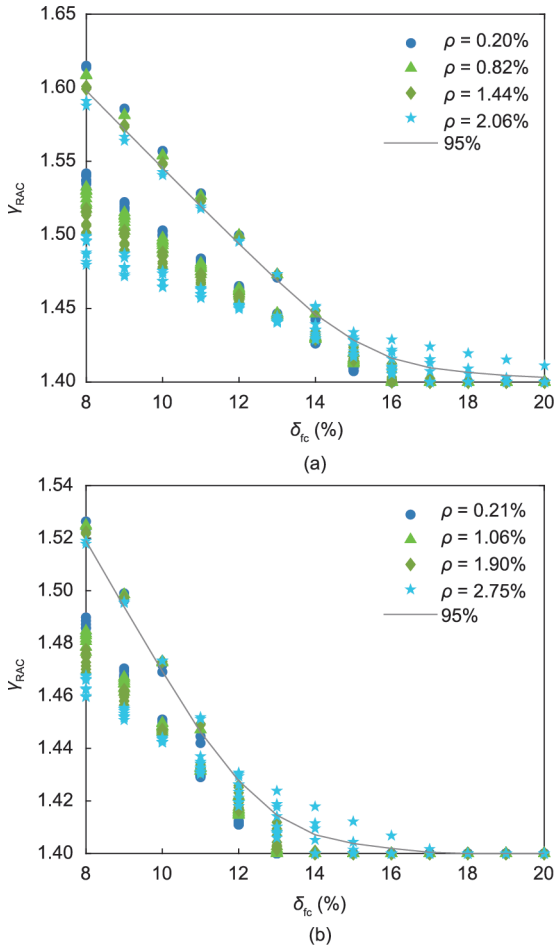

图9. 再生混凝土材料分项系数（强度标准值相同）。（a）C30；（b）C40。γ_{RAC}：RAC的局部安全系数；δ_{fc}：抗压强度的变异系数（COV）。

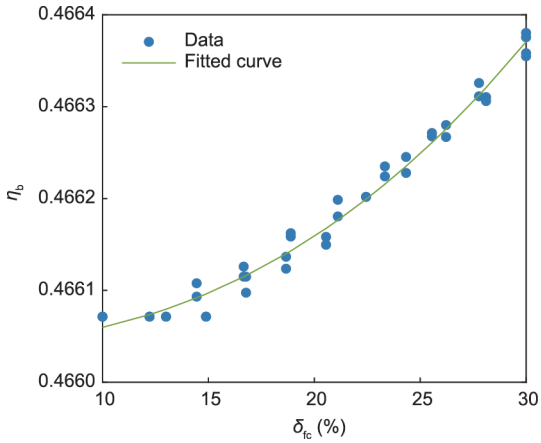

图10. 再生混凝土梁最小配筋率放大系数。

4.2. 混凝土梁最小配筋/箍率

4.2.1. 最小配筋率

与原生混凝土梁最小配筋率的表达式一致，再生混凝土梁最小配筋率表示为：

$$\rho_{R,\min}=\eta_b\frac{f_t}{f_y} \tag{8}$$

式中，η_b为配筋率系数，对于原生混凝土，$\eta_b=0.45$；f_t为再生混凝土抗拉强度设计值；f_y为纵向受力钢筋抗拉强度设计值。

保持再生混凝土梁与原生混凝土梁具有相同的可靠指标，与材料分项系数的计算方法一致，计算再生混凝土梁的最小配筋率。再生混凝土为C30和C40，钢筋为HRB335和HRB400，图10给出了η_b与再生混凝土抗压强度变异系数（δ_{ic}）的关系，决定系数R^2为0.98。

由图10可知，随着再生混凝土抗压强度变异系数的增加（10%到30%），再生混凝土梁的最小配筋率系数以指数形式增长。与原生混凝土梁相比，再生混凝土梁的最小配筋率提升幅度很小。这主要是由于在最小配筋率时，因钢筋的存在，再生混凝土强度的变异性对抗力的变异性影响有限，因此，当再生混凝土变异系数的增大时，再生混凝土梁的可靠指标下降幅度有限，仅需增加少量的配筋就可使再生混凝土梁的可靠指标达到原生混凝土梁的水平。综上，考虑再生混凝土的强度变异系数，η_b取为0.47。

4.2.2. 最小配箍率

再生混凝土梁与原生混凝土梁的最小配箍率具有类似的表达形式，再生混凝土梁最小配箍率表达式为：

$$\rho_{R,sv\,min}=\eta_s\frac{f_t}{f_y} \tag{9}$$

式中，η_s为配箍率系数，对于原生混凝土，η_s=0.24。

参照再生混凝土梁最小配筋率的计算方法，计算过程中，再生混凝土为C30和C40，钢筋为HPB300和HRB335，图11给出了η_s与再生混凝土抗压强度变异系数（δ_{ft}）的关系，决定系数R_2为0.97。

从图11可知，随着再生混凝土抗压强度变异系数的增加，最小配箍率系数η_s呈抛物线增长。当再生混凝土梁

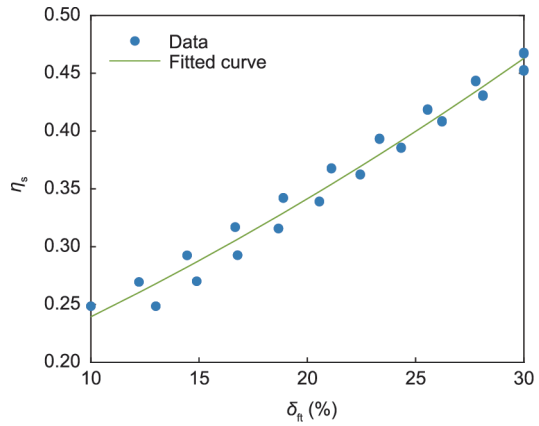

图11. 再生混凝土梁最小配箍率放大系数。

的混凝土等级为C30，箍筋为HRB335，变异系数为15%时，与原生混凝土梁相比，再生混凝土梁的最小配箍率增加约8.7%；而当变异系数增加到20%时，最小配箍率增加约36.3%，表明，在梁的配箍率较小时，再生混凝土的抗拉强度变异性对梁的抗剪承载力的变异性有显著影响，降低了梁的可靠指标，需要增加配箍率来保证可靠度满足要求。综上，当再生混凝土的强度变异系数控制在15%以内时，η_s可取为0.28。

4.3. 构件承载力设计

4.3.1. 正截面受弯承载力

梁的正截面受弯承载力M可由式（10）和式（11）计算，具体如下：

$$M \le \alpha_1 f_c b x (h_0 - \frac{x}{2}) \tag{10}$$

$$\alpha_1 f_c b x = f_y A_s \tag{11}$$

式中，α_1、f_c和x的定义与原生混凝土相同；f_c为再生混凝土轴心抗压强度设计值；α_1为再生混凝土受压区矩形应力图的应力值与混凝土轴心抗压强度设计值的比值，取α_1=1.0；x为再生混凝土受压区高度，$x \le \xi_b h_0$，ξ_b为矩形应力图形的相对界限受压区高度，$\xi_b = \beta_1/[1 + f_y/(E_s \varepsilon_{cu})]$，$\beta_1$为系数，根据本构计算取$\beta_1$=0.78，$E_s$为钢筋弹性模量，$\varepsilon_{cu}$为再生混凝土极限应变；$b$为截面宽度；$h_0$为截面有效高度；$f_y$、$A_s$分别为纵向钢筋抗拉强度设计值和截面总面积。

4.3.2. 斜截面受剪承载力

再生混凝土梁斜截面受剪承载力V可按式（12）计算：

$$V \le 0.9 \alpha_{cv} f_t b h_0 + A_{sv} f_{yv} \frac{h_0}{s} \tag{12}$$

式中，0.9是再生混凝土项可靠度调整系数；α_{cv}为再生混凝土斜截面受剪承载力系数，对于一般受弯构件取0.7，对集中荷载作用下（包括作用有多种荷载，其中集中荷载对支座截面或节点边缘所产生的剪力值占总剪力的75%以上的情况）的独立梁，取$\frac{1.75}{\lambda + 1}$，λ为计算截面的剪跨比；f_t为再生混凝土抗拉强度设计值；f_{yv}为箍筋抗拉强度设计值；A_{sv}为配置在同一截面内箍筋各肢的全部截面面积；s为沿构件长度方向的箍筋间距。

基于可靠度分析，计算得到了再生混凝土的材料分项系数、最小配筋率和配箍率以及构件承载力设计表达式。原生与再生混凝土的构件设计方法是相通的，局部的取值需要充分考虑再生混凝土的特性后进行调整，实现了原生与再生混凝土构件设计的统一。上述研究结果为国家标准DG/TJ 08–2018–2020的修编提供了理论支撑[2]。

5. 再生混凝土时变可靠度初探

基于可靠度分析，可以确定与原生混凝土相统一的再生混凝土构件的设计公式。对于耐久性问题，现行规范通过对混凝土强度等级、最小保护层厚度等进行相应的规定来保证。实际上，围绕再生混凝土构件的时变性能，已经进行了初步的研究，旨在为后续基于时变可靠度的原生和再生混凝土构件设计提供基础，主要包括原生与再生混凝土的时变强度、碳化性能、钢筋锈胀、时变可靠度等。

混凝土结构的耐久性破坏都是从混凝土或钢筋的材料劣化开始的，环境条件和自身因素都可以引起材料的劣化。笔者基于文献[44]中再生混凝土时变强度数据，在原生混凝土时变强度模型基础上，初步拟合得到了再生混凝土时变强度预测结果和对应的强度变异系数，结果发现，再生与原生混凝土的时变强度发展趋势一致，龄期较短时，再生混凝土强度低于原生混凝土。再生混凝土的抗压强度变异系数要高于原生混凝土，随着服役时间的增长，两者之间的绝对差值增大；再生混凝土和原生混凝土的变异系数先减小后逐渐增加。

围绕再生混凝土的碳化性能，国内外学者进行了大量的研究，提出了不同的碳化深度预测模型，笔者在现有模型的基础上，基于所考虑因素的重新评价，提出了修正后的再生混凝土碳化深度预测模型[45]，如式（13）所示，模型中考虑了骨料权重吸水率、温度、相对湿度、养护时间、水灰比、28天抗压强度、CO_2浓度和碳化时间：

$$x_c(t) = 104 k_A \cdot \sqrt[4]{T} \cdot k_e \cdot \sqrt{\frac{k_c \cdot W}{f_c^3 \cdot C}} \cdot k_{CO_2} \cdot \sqrt{t} \tag{13}$$

式中，$x(t)$为服役时间t时的碳化深度；k_A为骨料吸水率参数；T为温度（℃）；k_e为环境函数，$k_e = \mathrm{RH}^{1.5}(1 - \mathrm{RH})$，RH为相对湿度；$k_c$为执行转换参数；$W$和$C$分别为混凝土中水和水泥的含量（kg·m^{-3}）；k_{CO_2}为CO_2浓度系数，$K_{CO_2} = \sqrt{\frac{C_0}{0.03}}$；$C_0$是$CO_2$的体积浓度（%）。

分析发现，修正模型能很好地预测混凝土碳化深度，并通过10年龄期的混凝土碳化数据得到验证[44]。模型预测结果显示，再生与原生混凝土的碳化深度随时间增长逐渐增大，再生骨料取代率越高，碳化深度越大。

混凝土的碳化降低了pH值，造成钢筋脱钝，进而在环境的影响下引起钢筋的锈蚀。通过考虑混凝土的塑性性

能和不同的屈服准则重新评估了临界锈胀力，基于弹塑性分析，建立了临界锈胀力与影响因素之间的关系。

钢筋锈蚀后，随着锈胀力的增加，混凝土保护层从内侧开始开裂，在某一时刻，部分开裂的混凝土圆环就会分为塑性区和弹性区，将塑性区和弹性区分别从混凝土圆环中分离出来，可分别建立两个区的边界条件，考虑边界条件以及变形协调条件，给出了钢筋的临界截面损失率的计算步骤[46]。

在上述计算钢筋锈胀的过程中，没有区分再生与原生混凝土，因此，上述计算方法和模型对于两者都是适用的，是一种统一的钢筋锈胀预测模型，且该模型已被现有试验结果所验证[47]。

在再生混凝土时变强度、碳化深度和钢筋锈胀模型的基础上，采用 OpenSees 软件计算了再生混凝土梁的时变抗弯承载力，主要考虑再生混凝土本构关系的随机时变性和钢筋本构关系的随机时变性，计算得到了不同龄期的再生混凝土梁的抗弯承载力。图 12 和图 13 给出了拟合曲线与计算数据的对比，抗力和标准差的决定系数分别为 0.983、0.859，表明所建立的抗力时变模型能很好地反映再生混凝土梁的时变抗力数据。

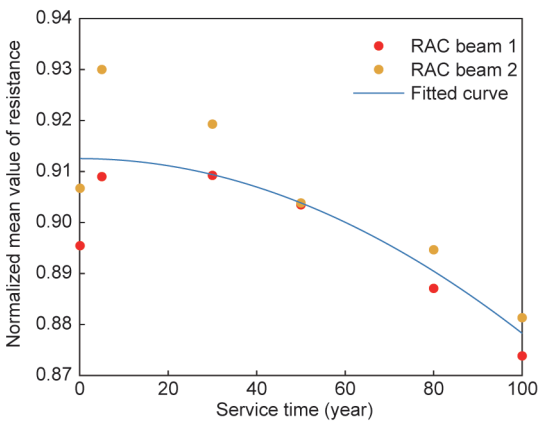

图 12. 抗力均值拟合结果。

随着服役时间的增长，抗力下降的速率增大，如图 12 所示，这主要是由于钢筋的截面损失率随着服役时间的增长而逐渐增加，其增加的速率逐渐增大。此外，再生混凝土的时变强度在达到峰值后，逐渐降低，也是造成抗力均值降低的原因；抗力的标准差随着服役时间的增长逐渐增大，如图 13 所示，这主要是由于钢筋的强度和再生混凝土的强度随着服役时间的增长，变异性增大，综上，钢筋再生混凝土梁的时变抗力均值逐渐降低，变异性逐渐增大。

基于建立的钢筋再生混凝土梁时变抗力模型，对时变抗力进行假设检验，分析发现，在服役周期内，抗力为对数正态随机过程。抗力退化会降低设计基准期内构件的可靠指标，影响结构安全，应对再生混凝土的材料分项系数进行修正，这也是后续研究的重点内容之一。

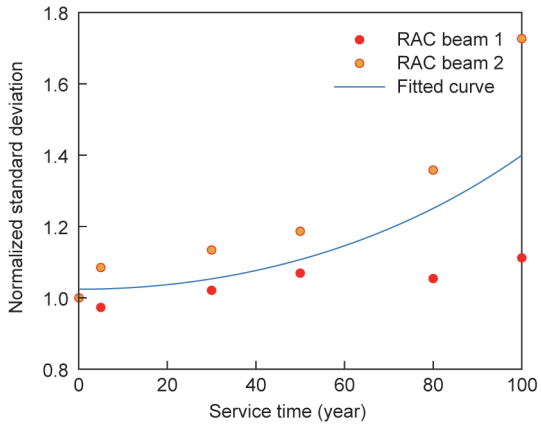

图 13. 抗力标准差拟合结果。

以再生混凝土梁为例，通过对时变强度、碳化深度、钢筋锈胀、时变抗力的分析，得到了其时变可靠度。需要指出的是，上述再生混凝土的时变强度、碳化深度预测结果主要是基于现有的试验数据得到的，试验数据的最长龄期为 10 年。在原生混凝土模型的基础上，初步得到了统一的原生与再生混凝土时变强度、碳化深度及钢筋锈胀预测模型。但再生混凝土的长龄期试验数据仍缺乏，需要更多的实际工程数据来修正模型。梁的时变抗力主要基于数值仿真得到，需要相关的耐久性试验和实际工程中的检测数据进行进一步验证。同时，需要开展其他再生混凝土构件的时变可靠度研究，为确定合理的基于时变可靠度的再生混凝土构件设计提供建议。在国家“双达峰”战略的背景下，再生混凝土结构的时变可靠度设计应考虑未来气候的变化，遵循安全和低碳协同设计的原则。

本节旨在提出再生混凝土构件的设计方法，使其能够充分考虑再生混凝土的各项性能，特别是耐久性能。基于此，笔者研究了再生混凝土的长期强度、碳化性能、再生混凝土中钢筋的腐蚀，以及再生混凝土梁的抗弯能力，并计算了再生混凝土构件的时变可靠性。结果表明，再生混凝土构件的时变可靠度是可以进行评估的，并且可为再生混凝土构件的设计提供重要参考。需要注意的是，研究过程中假设钢筋为均匀腐蚀，且采用了加速实验结果评估再生混凝土构件的长期性能，因此，在进一步的研究中，笔者将收集实际工程数据并评估再生混凝土构件的结构行为，从而更新和校准模型。最后，根据时变可靠度分析，提出能够反映再生和原生混凝土之间性能差异的再生混凝土的材料分项系数。

为了建立再生与原生混凝土构件的统一设计理论，需要考虑以下问题。再生混凝土的强度可以通过取代率的相关函数与原生混凝土的强度相关联。然而，其变异性和取代率之间的关系很难确定；其中的关键问题是确定设计参数。为了实现统一的设计方法，再生混凝土和原生混凝土结构的目标可靠性必须是一致的。此外，考虑到再生混凝土结构的特点，需要在原生混凝土设计方法的基础上进行修正，使之能够应用于现有的设计软件。图 14 总结和说明了统一设计理论的概念。需要注意的是，再生混凝土的荷载效应与原生混凝土的荷载效应相比有一定的差异，有待进一步研究。例如，由于热和阻尼参数的不同，在地震力和不同温度下，RAC 的结构作用效果也不同。

6. 结语与展望

6.1. 结论

本文从原生与再生混凝土结构构件统一设计的需求出发，分析了原生与再生混凝土的强度取值、受压本构关系以及基于可靠度的构件统一设计方法，主要结论如下：

（1）再生混凝土的强度变异系数整体上高于原生混凝土，这主要是由再生骨料的来源复杂以及再生骨料表面附着旧砂浆含量和质量的随机性决定的。再生混凝土的抗压强度及抗拉强度代表值的定义和取值方法与原生混凝土一致，再生混凝土强度的离散性高导致其标准差变大，进而会影响强度代表值的具体取值，因此需要修正再生混凝土的材料分项系数。

（2）在原生混凝土单轴受压本构关系模型的基础上，通过修正特征指标之间的函数关系，得到了统一的原生与再生混凝土本构关系模型。与原生混凝土相比，再生混凝土弹性模量降低，应力-应变曲线下降段变陡，表明再生混凝土脆性增加。随机分布检验结果表明，在给定应变时，应力服从正态分布，这为再生混凝土结构非线性分析奠定了基础。

（3）基于可靠度分析，确定了再生混凝土的材料分项系数，梁的最小配筋率、配箍率以及承载力设计公式。与原生混凝土相比，再生混凝土力学性能的变异性高，导致其材料分项系数变大，梁的最小配筋率和配箍率提高。提出了再生混凝土构件可靠度调整系数，实现了原生与再生混凝土构件承载力设计公式的统一，也为再生混凝土的计算机辅助设计提供了便捷实施的理论基础。

（4）混凝土的强度发展、碳化、嵌入钢筋的锈胀是影响原生与再生混凝土结构时变承载力的重要因素。承载力均值随服役时间降低，变异系数逐渐增加，导致原生与再生混凝土结构时变可靠指标降低。当前的设计方法主要基于时不变理论，通过构造措施保证其服役期内的安全性，未来把原生与再生混凝土统一到基于时变可靠度的结构设计方法上，可以更好推动设计水平的提高和设计理论的完善。

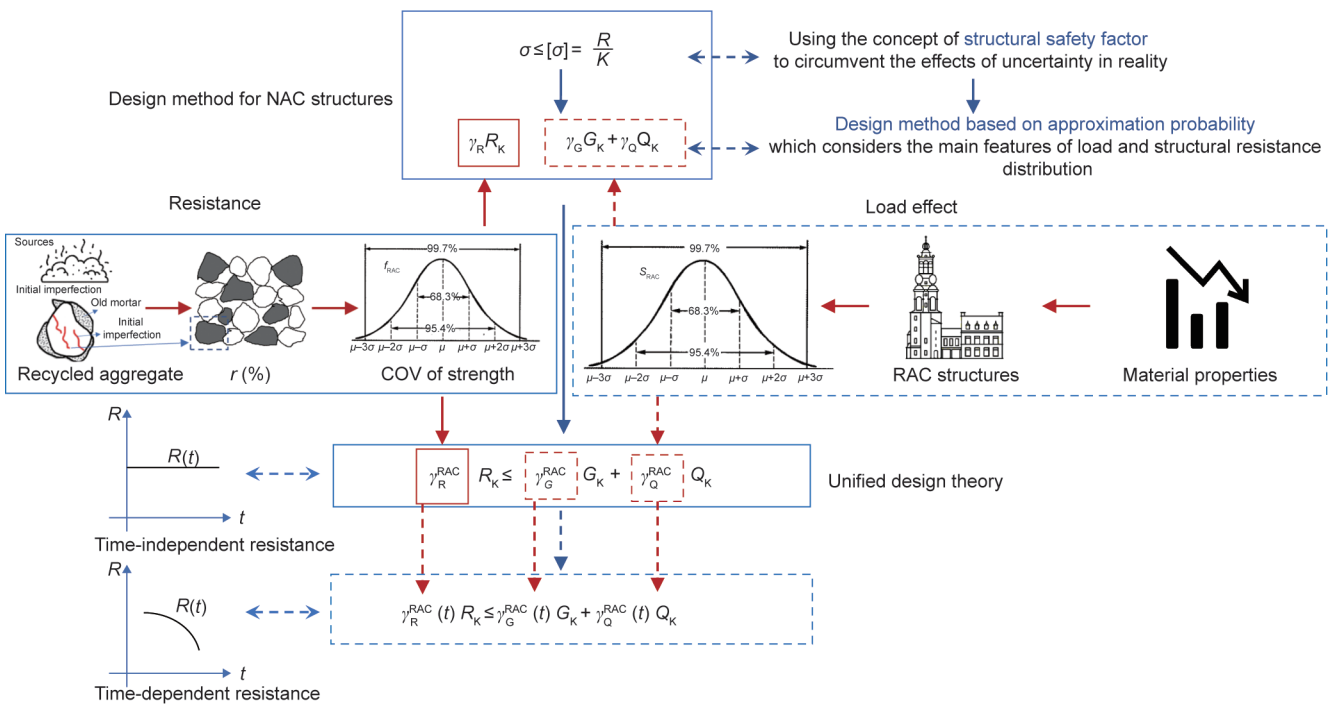

图 14. 再生与原生混凝土结构统一设计理论思路。

6.2. 展望

未来的研究可主要集中在以下几个方面：

（1）再生混凝土长期性能。从变异性和时变性的角度，基于多尺度深入研究再生混凝土长期性能的演化规律并提出相应的改性调控方法，是保证其安全应用的前提。

（2）再生混凝土构件及结构的服役性能监测。从实际工程中得到准确的再生混凝土构件受力性能大数据，才能准确把握其安全和使用性能，同时可为再生混凝土结构的设计提供反馈与校验。

（3）再生混凝土的碳排放性能。需要加强再生混凝土碳排放因子的分析，构建再生混凝土碳排放数据，考虑安全和低碳两个方面，从可持续性的高度，进一步完善再生和原生混凝土的统一设计方法。

致谢

感谢国家杰出青年科学基金（51325802）以及国家自然科学基金（51178340, 52078358, 52008304）对本研究的支持。

Compliance with ethics guidelines

Jianzhuang Xiao, Kaijian Zhang, Tao Ding, Qingtian Zhang, and Xuwen Xiao declare that they have no conflicts of interest or financial conflicts to disclose.

References

[1] Bendixen M, Best J, Hackney C, Iversen LL. Time is running out for sand. Nature 2019;571(7763):29–31.
[2] Construction SR, Committee M. DG/TJ 08–2018-2020: Technical standard on the application of recycled aggregate concrete. Chinese standard. Shanghai: Tongji University Press; 2020. Chinese.
[3] Marinković SB, Malešev M, Ignjatović I. Life cycle assessment (LCA) of concrete made using recycled concrete or natural aggregates. In: Pacheco-Torgal F, Cabeza LF, de Magalhães A, editors. Eco-efficient construction and building materials. New Deli: Woodhead Publishing; 2014. p. 239–66.
[4] Duan Z, Hou S, Xiao J, Li B. Study on the essential properties of recycled powders from construction and demolition waste. J Clean Prod 2020; 253: 119865.
[5] de Oliveira MB, Vazquez E. The influence of retained moisture in aggregates from recycling on the properties of newly hardened concrete. Waste Manage 1996;16(1–3):113–7.
[6] Poon CS, Shui ZH, Lam L. Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates. Constr Build Mater 2004;18(6):461–8.
[7] Adessina A, Ben Fraj A, Barthélémy J, Chateau C, Garnier D. Experimental and micromechanical investigation on the mechanical and durability properties of recycled aggregates concrete. Cement Concr Res 2019;126:105900.
[8] Bravo M, de Brito J, Pontes J, Evangelista L. Mechanical performance of concrete made with aggregates from construction and demolition waste recycling plants. J Clean Prod 2015;99:59–74.
[9] Etxeberria M, Vázquez E, Marí A, Barra M. Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. Cement Concr Res 2007;37(5):735–42.
[10] Thomas C, de Brito J, Cimentada A, Sainz-Aja JA. Macro- and micro-properties of multi-recycled aggregate concrete. J Clean Prod 2020;245:118843.
[11] Ozbakkaloglu T, Gholampour A, Xie TY. Mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete: effect of recycled aggregate properties and content. J Mater Civ Eng 2018;30(2):04017275.
[12] Shi C, Li Y, Zhang J, Li W, Chong L, Xie Z. Performance enhancement of recycled concrete aggregate—a review. J Clean Prod 2016;112:466–72.
[13] Kazmi SMS, Munir MJ, Wu Y, Patnaikuni I, Zhou Y, Xing F. Effect of recycled aggregate treatment techniques on the durability of concrete: a comparative evaluation. Constr Build Mater 2020;264:120284.
[14] Song IH, Ryou JS. Hybrid techniques for quality improvement of recycled fine aggregate. Constr Build Mater 2014;72:56–64.
[15] Xiao J, Li J, Zhang C. Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading. Cement Concr Res 2005;35(6):1187–94.
[16] Xiao JZ, Zhang KJ, Akbarnezhad A. Variability of stress-strain relationship for recycled aggregate concrete under uniaxial compression loading. J Clean Prod 2018;181:753–71.
[17] Domínguez-Santos D, Letelier V, Muñoz P. Seismic capacity of 2- and 3-storey RC buildings with eco-concrete made by using residues for replacing natural aggregates. J Build Eng 2020;28:101086.
[18] Al Mahmoud F, Boissiere R, Mercier C, Khelil A. Shear behavior of reinforced concrete beams made from recycled coarse and fine aggregates. Structures 2020;25:660–9.
[19] Li T, Xiao J, Singh A. Influence of new-to-old concrete interface on the damping behavior of recycled aggregate concrete. Struct Concr 2021; 22(5): 3109–22.
[20] Khan A, Aziz T, Fareed S, Xiao J. Behaviour and residual strength prediction of recycled aggregates concrete exposed to elevated temperatures. Arab J Sci Eng 2020;45(10):8241–53.
[21] Pacheco J, de Brito J. Structural reliability of recycled aggregate concrete. In: de Brito J, Agrela F, editors. New trends in eco-efficient and recycled concrete. New Delhi: Woodhead Publishing; 2019. p. 541–72.
[22] Pacheco J, de Brito J, Chastre C, Evangelista L. Eurocode shear design of coarse recycled aggregate concrete: reliability analysis and partial factor calibration. Materials 2021;14(15):4081.
[23] Silva RV, de Brito J, Dhir RK. Establishing a relationship between modulus of elasticity and compressive strength of recycled aggregate concrete. J Clean Prod 2016;112:2171–86.
[24] Breccolotti M, Materazzi AL. Structural reliability of bonding between steel rebars and recycled aggregate concrete. Constr Build Mater 2013;47: 927–34.
[25] Pacheco JN, de Brito J, Chastre C, Evangelista L. Bond of recycled coarse aggregate concrete: model uncertainty and reliability-based calibration of design equations. Eng Struct 2021;239:112290.
[26] Breccolotti M, Materazzi AL. Structural reliability of eccentrically-loaded sections in RC columns made of recycled aggregate concrete. Eng Struct 2010; 32(11):3704–12.
[27] Silva RV, de Brito J. Reinforced recycled aggregate concrete slabs: structural design based on Eurocode 2. Eng Struct 2020;204:110047.
[28] Ju H, Yerzhanov M, Serik A, Lee D, Kim JR. Statistical and reliability study on shear strength of recycled coarse aggregate reinforced concrete beams. Materials 2021;14(12):3321.
[29] Sunayana S, Barai SV. Shear and serviceability reliability of recycled aggregate concrete beams. ACI Struct J 2021;118(2):225–36.
[30] Albuquerque A, Pacheco J, de Brito J. Reliability-based recommendations for EN1992 carbonation cover design of concrete with coarse recycled concrete aggregates. Struct Concr 2022;23(3):1873–89.
[31] Faleschini F, Zanini MA, Hofer L. Reliability-based analysis of recycled aggregate concrete under carbonation. Adv Civ Eng 2018;2018:1–11.
[32] Dehvari AG, Miri M, Sohrabi MR. Reliability-based design optimization of recycled coarse aggregates used in corrosive environment. J Mater Civ Eng 2021;33(4):04021042.
[33] Cao H, Zhao L, Lu C, Guan L, Qiao H, Li Q. Degradation resistance and reliability analysis of recycled aggregate concrete in a sulfate environment. Adv Mater Sci Eng 2020;2020:1–11.
[34] Li J, Qiao H, Guan L, Zhu F. Sulfate attack resistance and reliability analysis of recycled aggregate concrete. Emerg Mater Res 2020;9(3):877–86.
[35] Torben CH. Recycled aggregates and recycled aggregate concrete second state-of-the-art report developments 1945–1985. Mater Struct 1986;19: 201–46.
[36] Rahal K. Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate.

Build Environ 2007;42(1):407–15.
[37] Watanabe T, Nishibata S, Hashimoto C, Ohtsu M. Compressive failure in concrete of recycled aggregate by acoustic emission. Constr Build Mater 2007; 21(3):470–6.
[38] Tabsh SW, Abdelfatah AS. Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete. Constr Build Mater 2009;23(2):1163–7.
[39] Xiao ZJ, Li JB, Zhang C. On statistical characteristics of the compressive strength of recycled aggregate concrete. Struct Concr 2005;6(4):149–53.
[40] Yuan B. On values of compressive strength and tensile strength of recycled aggregate concrete [dissertation]. Shanghai: Tongji University; 2007. Chinese.
[41] Matias D, de Brito J, Rosa A, Pedro D. Mechanical properties of concrete produced with recycled coarse aggregates-influence of the use of superplasticizers. Constr Build Mater 2013;44:101–9.
[42] Ministry of Housing and Urban–Rural Development of the People's Republic of China. GB 50010 – 2010: Code for design of concrete structures. Chinese standard. Beijing: China Architecture and Building Press; 2010. Chinese.
[43] Xiao JZ. Recycled aggregate concrete structure. Berlin: Springer; 2018.
[44] Kou S, Poon C. Long-term mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete prepared with the incorporation of fly ash. Cement Concr Compos 2013;37:12–9.
[45] Zhang KJ, Xiao JZ. Prediction model of carbonation depth for recycled aggregate concrete. Cement Concr Compos 2018;88:86–99.
[46] Zhang KJ, Xiao JZ, Zhao YX, Zhang QT. Analytical model for critical corrosion level of reinforcements to cause the cracking of concrete cover. Constr Build Mater 2019;223:185–97.
[47] Zhao Y, Yu J, Wu Y, Jin W. Critical thickness of rust layer at inner and out surface cracking of concrete cover in reinforced concrete structures. Corros Sci 2012;59:316–23.