

# 受弯构件的变形性与新的性能指标的研究

冯 鹏, \*叶列平, 黄羽立

(清华大学土木工程系, 北京 100084)

**摘 要:** 提出用变形性代替传统延性的概念以适应使用了新型材料(如纤维增强复合材料, 即 FRP)的受弯构件的荷载 - 变形关系的多样化。通过分析已有的性能指标, 定义了设计目标状态和极限破坏状态作为构件的性能特征状态, 并提出一组新的性能指标: 变形性系数  $D$ 、承载力系数  $S$ 、变形能系数  $Y$  和综合性能系数  $F$ , 用以全面地描述各种构件的性能和安全储备。参照传统构件, 分析了 5 种受弯构件的数值计算结果, 获得了各性能指标的取值范围及它们之间的关系, 并提出可以通过提高构件承载能力来弥补其变形储备不足从而保证总体安全储备不变。建议用  $F$  指标来确定各种受弯构件的设计目标状态, 从而获得合理且一致的安全性储备, 并以 8 个试验构件为例进行了计算, 验证了其合理性。包括变形性在内的性能指标的提出, 为新型材料结构设计提供了参考。

**关键词:** 受弯构件; 延性; 安全储备; 纤维增强复合材料(FRP); 预应力混凝土梁; FRP 配筋混凝土梁; FRP 加固混凝土梁; 荷载 - 变形曲线

中图分类号: TU31 文献标识码: A

## DEFORMABILITY AND NEW PERFORMANCE INDICES OF FLEXURAL MEMBERS

FENG Peng, \*YE Lie-ping, HUANG Yu-li

(Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Instead of conventional ductility, deformability is proposed for various load-deformation curves of members made of new materials, such as fiber reinforced polymer (FRP). After analyzing the existent performance indices, the design-aimed state and the ultimate failure state are defined as the characteristic behavior states for members. Moreover, a set of performance indices, including deformability factor  $D$ , strength factor  $S$ , deformation energy factor  $Y$  and overall performance factor  $F$ , are presented to describe the behavior and the safety storage of flexural members comprehensively. Comparing with the traditional members, the relation among the performance indices is analyzed by the numerical results of five types of members and the ranges of the indices are acquired. It is drawn that the safety storage for strength and deformation can be exchanged without overall safety margin loss.  $F$  factor is suggested to serve as the scale for determining the design-aimed state, by which the reasonable uniform safety storage for various flexural members can be acquired. It is proven by evaluating eight specimens in references. The proposal of the performance indices including deformability provides a reference for the design of members made of new materials.

**Key words:** flexural member; ductility; safety margin; fiber reinforced polymer (FRP); pre-stressed concrete beam; FRP-reinforced concrete beam; FRP strengthened concrete beam; load-deformation curve

收稿日期: 2003-11-24; 修改日期: 2004-05-31

基金项目: 国家自然科学基金资助重点项目(50238030); 国家 863 计划资助项目(2001AA336010)

作者简介: 冯 鹏(1977), 男, 陕西耀县人, 博士生, 从事结构工程研究(E-mail: fengpeng@tsinghua.edu.cn);

\*叶列平(1960), 男, 浙江温州人, 教授, 从事结构工程研究(E-mail: ylp@tsinghua.edu.cn);

黄羽立(1980), 男, 广东广州人, 硕士生, 从事结构工程研究。

为保证工程结构的安全，在设计中一般以承载力和变形作为最重要的设计指标。早期的基于弹性分析的设计方法中，如容许应力设计法，承载力为主要的指标。而目前普遍采用的极限状态设计方法，是基于对结构弹塑性受力性能研究的深入以及人们对结构使用要求的提高而提出的。对于一般的钢结构和钢筋混凝土结构的设计，除了需要考虑承载力外，还要求结构有一定的延性。延性是指结构、构件、截面以及材料在破坏前且承载能力没有明显下降的情况下所具有的非弹性变形能力<sup>[1]</sup>，延性系数是反映延性大小的参数。

对于常见的钢筋混凝土结构和钢结构，好的延性一方面可以保证结构在发生破坏前时有能力吸收一定的能量，使其在遭受意外冲击或动力荷载，例如强烈地震时，不会因过大的能量输入而使结构突然丧失承载能力；另一方面，可以使结构在破坏前有较明显的变形征兆，防止超载而造成的突然破坏。因此，延性是反映这些结构安全性的一个性能指标。它们在接近或达到最大承载力时，结构承载力的安全储备很小甚至没有，只能依靠延性的提供安全储备。

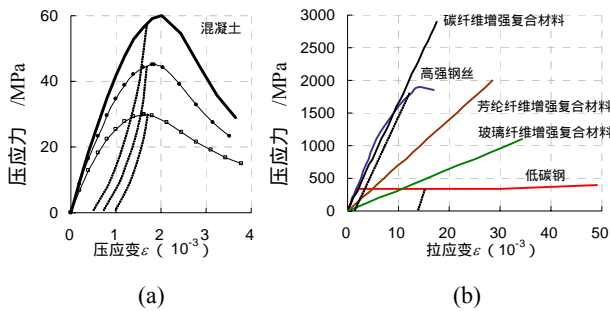


图1 常见的结构材料的应力 - 应变关系曲线

Fig.1 Stress-strain curves of familiar structural materials

近年来，一些新型结构材料开始在工程结构中使用，如高强度钢筋、FRP(纤维增强复合材料)、玻璃等，这些材料的力学性能与低碳钢和混凝土有很大的差别。图1为几种常见结构材料的应力 - 应变关系曲线，其中虚线为卸载曲线。由图可见，传统的结构材料：低碳钢和混凝土，与FRP、高强钢丝等材料相比有以下的差别：(1) 低碳钢和混凝土都有一个明显的屈服平台段或缓慢的下降段，而其它材料基本直线上升，没有屈服平台或下降段；(2) 低碳钢和混凝土在达到最大应力后卸载有明显的残余变形，而高强钢丝几乎没有残余变形，FRP材料都为线弹性材料，卸载曲线和加载曲线基本重合，在断裂前没有塑性变形发生；(3) 到达极限时，

低碳钢和混凝土的总应变中塑性应变占主要部分，而对于其它几种材料，破坏以前的应变主要为可恢复的弹性应变。

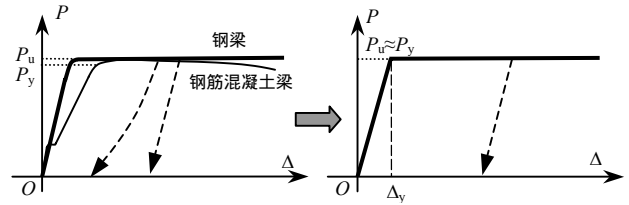


图2 延性结构荷载 - 变形关系的近似

Fig.2 Approximation of the load-deformation relations of ductile structures

材料性能的差异导致了构件性能的大相径庭。对于配筋合适的钢筋混凝土梁，典型的荷载 - 位移关系曲线为三折线：最初近似为线弹性，开裂后刚度降低，但仍保持上升，钢筋屈服后，承载力基本不再增加，而变形显著增大，有一个明显的屈服平台；钢梁也具有类似的特征。在钢材屈服以后，它们的承载力不会有很大提高，极限荷载与屈服荷载基本相等，即  $P_u \approx P_y$ 。因此，如图2所示，它们的荷载 - 变形关系可以近似看作是理想的双线性，而且在屈服以后，塑性变形持续发展，弹性变形不再增加。基于这样的性能特征，用塑性变形的能力，通过极限变形与屈服变形之比，即延性系数，就能够从整体上反映出构件的受力状况，具有这种特征的结构称为延性结构。

但是对于FRP等具有线弹性特征的高强材料，在破坏以前的变形主要为弹性变形，仍用延性指标来描述它们组成的构件或结构的性能，并作为设计控制指标，则会造成“由于这种类型的构件没有足够的延性而不能使用”的错误概念。而实际上通过图1(B)可以看到，FRP材料和高强钢丝在具有很高强度的同时也能达到1.5~3.5%的延伸率。在图3中有3个不同类型的FRP构件的荷载 - 挠度关系：SPW为跨中一点弯曲的纯FRP板<sup>[2]</sup>，A80-80-S为四点弯曲的FRP预应力混凝土梁<sup>[3]</sup>，B9为四点弯曲的FRP布加固的钢筋混凝土梁<sup>[4]</sup>。可以看出，它们具有较大的变形能力，达到跨度的1/38~1/67，同时承载力保持增长，所以也能吸收大量能量。只要保证构件满足设计的位移控制要求，并且具有一定的保证率，是不会造成安全问题；相反，由于以弹性变形为主，这类结构和构件的变形在卸载后基本能够恢复，如图3中SPW，损伤小，基本不用修复。另一方面，它们在破坏前也有非常显著的变形，如

图4所示的SPW,足以有预警效果。并且承载能力随变形的增大而增大,这对偶然超载也是十分有利的。因此,传统的延性的概念已不能全面合理的反映各种的构件的受力性能和变形性能了。1996年, Mufti 在研究 FRP 配筋混凝土梁的基础上提出了变形性(deformability)的概念<sup>[5]</sup>,它是指构件总的变形能力,包括弹性变形和非弹性变形,比延性的概念更为全面。

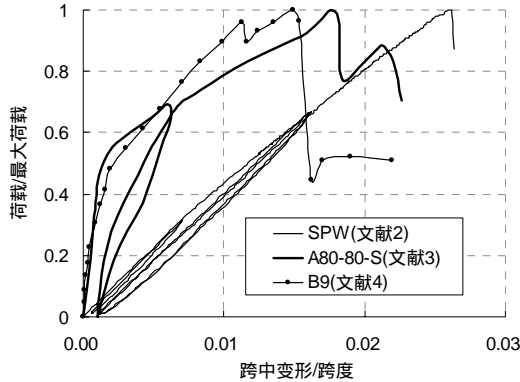


图3 应用FRP的受弯构件的荷载-变形试验曲线

Fig.3 Load-deformation curves of tested flexural members using FRP



图4 破坏前的FRP板(SPW)

Fig.4 A tested FRP deck (SPW) before failure

从另一个角度来看,在相同设计条件下,采用不同材料、不同类型的构件,性能差异很大,就需要有统一的性能指标来衡量构件的性能。如图5所示的两种构件的荷载-位移曲线, $S_d$ 为设计需求的承载力, $[\Delta]$ 为设计允许的极限变形,两者都能满足承载力和变形的设计要求。但从延性指标上来看,比要好。但如果这个构件有可能会承受超载,那么应该是比要好。采用单一的性能指标,即使是变形性指标,仍然不能完整反映构件的性能,因为它不能反映构件在变形的同时承载能力的变化。钢梁和钢筋混凝土梁的荷载-位移曲线在钢材屈服后的平台,使人们忽略了承载能力的变化对结构安全储备的作用。因此,需要更为全面合理且物理概念明确的指标,来反映各种材料组成的构件和结构的性能。从相反的角度来看,由于线弹性高强材料的破坏表现为脆性,如何合理确定其可用强度从而保证构件有充分的安全储备是工程设计人

员和研究者都很关心的问题。

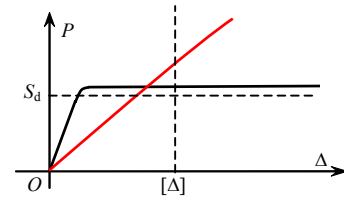


图5 两种不同类型的荷载-位移关系

Fig.5 Two different load-deflection relations

本文以几种不同类型的受弯构件为例,回顾已有的各种延性及变形性指标的定义,并从其概念和定义方法上进行分析。通过定义构件荷载-变形曲线上两个特征点,建议4个统一的性能指标:变形性系数 $D$ 、承载力系数 $S$ 、变形能系数 $Y$ 和综合性能系数 $F$ ,用它们来研究解决前面提出的问题。用变形性系数代替延性系数来描述各种构件的变形能力,用4个性能指标完整表达各种构件的受力特征;分析各个性能指标之间以及它们与构件安全储备之间的关系;以传统构件为参照,选取适当的性能指标,确定其它类型的构件的性能特征点,保证正常设计的各种构件都有基本一致的安全储备。

## 1 已有性能指标的回顾

### 1.1 传统的延性系数

传统的延性系数是在钢构件和钢筋混凝土构件的受力性能基础上建立的,为极限变形与屈服变形之比,针对所研究的情况,可分为曲率延性系数、转角延性系数和位移(挠度)延性系数,即:

$$\mu_\phi = \frac{\Phi_u}{\Phi_y}, \quad \mu_\theta = \frac{\theta_u}{\theta_y}, \quad \mu_\Delta = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (1)$$

对于受弯构件,曲率是对应于截面变形,转角一般是针对构件局部,如塑性铰区段,挠度是针对整个构件。由于位移在试验中较容易获得,而在考虑塑性的计算中较复杂,本文后面主要以截面的弯矩-曲率关系来分析和讨论。

能量延性系数为极限变形能 $E_u$ (荷载-变形曲线下的总面积)与屈服时的变形能 $E_y$ (屈服点前的荷载-变形曲线下的面积)之比,如图6(A)所示:

$$\mu_E = \frac{E_u}{E_y} \quad (2)$$

它不仅能反映构件的变形储备还能反映承载力储备。对理想弹塑性情况有:

$$\mu_E = 2\mu_\Delta - 1 \quad (3)$$

对于无明显屈服点的材料和构件,延性系数的

定义都无法直接应用。

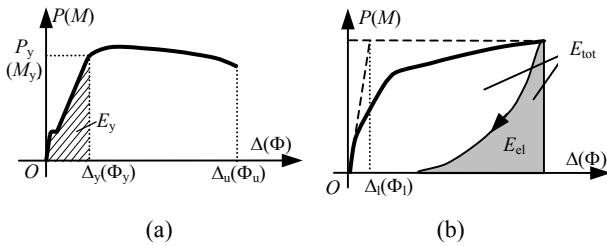


图6 延性系数的定义

Fig.6 Definition of ductility factors

### 1.2 改进的延性系数

由于传统延性系数对无明显屈服点的构件不适用,就有学者对传统的延性系数进行了改进。

1995年,Abdelrahman等人<sup>[6]</sup>在研究FRP筋预应力混凝土梁的基础上,提出一个改进的延性系数:

$$\mu_{\phi,A} = \frac{\phi_u}{\phi_1}, \quad \mu_{\Delta,A} = \frac{\Delta_u}{\Delta_1} \quad (4)$$

其中, $\phi_u$ 和 $\Delta_u$ 为极限曲率和变形, $\phi_1$ 和 $\Delta_1$ 为极限荷载下用未开裂的构件刚度计算的等效曲率和变形,如图6(B)所示。这个系数实质上是通过定义一个名义屈服点来继续使用延性的概念,与Thompson等人<sup>[7]</sup>建议的方法类似。这个名义屈服点依赖于构件的初始刚度,与曲线的变化规律无关,因此它的适用性不广。实际上,对于荷载-变形曲线上无明显屈服点的构件,还有一些其它的方法<sup>[8,9]</sup>来确定名义屈服点,但同样不具有推广意义。

1995年,Naaman等人<sup>[10]</sup>基于钢筋和FRP筋预应力混凝土梁的特点,提出一个能量表达的延性系数:

$$\mu_{E,N} = \frac{1}{2} \left( \frac{E_{tot}}{E_{el}} + 1 \right) \quad (5)$$

其中, $E_{tot}$ 为总变形能; $E_{el}$ 为可恢复的弹性变形能,如图6(B)中阴影部分的面积,文献<sup>[10]</sup>中给出了预应力混凝土梁卸载刚度的确定方法。实际上, $\mu_{E,N}$ 是将式(1)对双线性理想弹塑性模型用能量形式表述推导得到的,即以可恢复的弹性变形能作为参照来反映塑性变形能力的大小,从而将传统延性系数推广到无明显屈服点的一般荷载-变形关系。这个定义比采用名义屈服点的方法物理概念更为明确。但与传统延性系数相同,如果在总变形中弹性变形占主要, $\mu_{E,N}$ 就很小,因此这个指标本质上还没有突破传统延性系数的局限。

### 1.3 变形性系数及综合性能指标

随着研究的深入,延性概念的局限性被逐渐认识到。Mufti等人<sup>[5]</sup>在研究FRP配筋混凝土梁和钢筋混凝土梁的基础上明确提出了变形性的概念,并给出了一套性能指标,其中包括一个反映受弯构件综合性能的 $J$ 指标<sup>[11]</sup>:

$$\text{承载力系数} \quad S_J = \frac{M_u}{M_c} \quad (6)$$

$$\text{变形性系数} \quad D_J = \frac{\phi_u}{\phi_c} \quad (7)$$

$$\text{综合性能系数}(J \text{ 指标}) \quad J = S_J \cdot D_J = \frac{M_u}{M_c} \cdot \frac{\phi_u}{\phi_c} \quad (8)$$

$M_u$ 为极限弯矩, $\phi_u$ 为极限曲率; $M_c$ 和 $\phi_c$ 分别为混凝土梁受压边缘应变 $\varepsilon_c=0.001$ 时的弯矩和曲率,因为当 $\varepsilon_c < 0.001$ 时,混凝土的受压应力应变关系基本可视为线弹性<sup>[5]</sup>。文献<sup>[5]</sup>和文献<sup>[11]</sup>中对矩形截面和T形截面的FRP配筋混凝土梁进行了分析,发现 $J$ 指标对应于构件中混凝土相对受压区高度的变化,能够较好的描述出FRP预应力混凝土梁的整体性能。 $J$ 指标是以混凝土压应变 $\varepsilon_c=0.001$ 为特征点定义的变形性系数和承载力系数的乘积,从弯矩-曲率曲线上来看,是构件变形能与变形余能之和的比值,它能够较全面的反映FRP配筋混凝土梁的受力性能。同时提出的承载力系数和变形性系数,用于反映构件和结构的安全储备更为全面。但它们仍仅仅适用FRP配筋混凝土梁,对于其它类型的构件仍不适用,尤其是 $M_c$ 和 $\phi_c$ 的定义和取值无法推广到其它材料。

加拿大公路桥梁设计规范(CHBDC)中采用了这个指标<sup>[12]</sup>,并且将“变形性的设计”单独列为一节。根据Mufti等人的研究成果,规范要求 $J$ 指标对矩形截面梁不小于4,对T形截面梁不小于6。

2000年美国混凝土协会的440委员会出版的《FRP筋混凝土结构设计指南》<sup>[13]</sup>中,也明确提出了变形性的概念,并定义变形性系数为“极限承载力时的变形能(弯矩-曲率关系曲线下的面积)与正常工作水平下的变形能之比”,即,

$$D_{E,ACI} = \frac{E_u}{E_s} \quad (9)$$

这个系数包涵了设计的承载力极限状态和正常使用极限状态,用以反映构件在超过工作水平时的综合性能和安全储备。但文献<sup>[13]</sup>中没有详细给出它的计算方法以及“正常工作水平”的定义,在整个设计流程中也没有用这个参数。

2004年, Tann 等人<sup>[14]</sup>在对 FRP 加固钢筋混凝土梁研究的基础上, 提出了一个变形性系数:

$$D_{\Delta,T} = \frac{\Delta_{0.95}}{\Delta_s} \quad (11)$$

$\Delta_{0.95}$  为 95%最大承载力时构件的变形,  $\Delta_s$  为正常工作状态下的变形, 文中建议用 67%的设计极限荷载下的构件变形。这个系数也强调了工作状态和极限状态间的比较, 并定义了这两个状态相应的荷载水平。实际上, 它是在构件具有相同的承载力储备(0.95 最大承载力 - 0.67 设计极限承载力)的前提下, 比较变形能力的储备。这样定义将承载力水平过于简单化, 而且对有下降段的构件很难定义, 因此不能推广到其它情况。

#### 1.4 鲁棒性系数

2001年, Van Erp<sup>[15]</sup>在对 FRP 构件受力性能与传统材料受力性能进行对比的基础上提出: 构件的鲁棒性应从抗超载能力和变形能力两个方面进行考虑, 并且一个构件应具有足够的鲁棒性, 进而提出反映构件综合性能的鲁棒性系数:

$$R = S_R \cdot D_R = \frac{S_u}{S_s} \cdot \frac{A_u}{A_s} \quad (12)$$

其中,  $S_R$  为极限承载力与正常使用状态下所受荷载之比, 称为承载力系数;  $D_R$  为极限状态与正常使用状态下的变形之比, 称为变形性系数。鲁棒性系数  $R$  与  $J$  指标类似, 从概念上看略有不同, 鲁棒性系数  $R$  更具一般性。

#### 1.5 其它文献中的性能指标

除了前面提及的以外, Zou<sup>[3]</sup>和美国联邦公路局(FHWA)的研究报告<sup>[16]</sup>中也对延性系数、变形性系数以及综合性能系数进行了定义, 但其定义方法在概念上不够合理, 不具代表性, 故不再列出。

## 2 性能指标概念及定义方法的讨论

根据前面的回顾, 可以按照物理概念把已有的性能指标可以分为四类: 广义变形之比、荷载之比、变形能之比以及变形与对应荷载乘积之比。它们从不同的角度描述构件的性能, 对应到安全储备上依次为: 变形能力的储备、承载能力的储备、能量吸收能力的储备以及变形能力储备与承载能力储备的乘积。足够的变形能力储备能够使构件在坍塌破坏前足够可观测到的变形预兆; 承载能力的储备反映了构件承受意外超载的能力; 而后两者则从整体上反映了构件综合的安全储备。在传统的结构设计

中一般对前两者考虑的较多, 而要全面合理地反映各种不同受力特点的构件, 则需要后两者从整体上进行描述。因此, 这四种形式的性能指标都应在工程设计中予以考虑。

在已有指标的定义中, 除了Naaman等人<sup>[10]</sup>建议的式(5)中的延性系数以外, 都依赖于结构的两个特征状态。分子上为构件的极限破坏状态, 而分母上状态的定义是不统一的, 但都基本对应着构件的正常工作水平的上限。为了更好的描述各种构件的受力性能, 定义这个状态为“设计目标状态”(design-aimed state)。它是结构在正常工作状态下受力的上限, 通常按照此时结构的荷载承受能力来进行承载力极限状态设计, 一般情况下可满足结构的安全性要求。与之相对应, 极限破坏状态(ultimate failure state)是指结构超过该状态将发生垮塌或完全失效。这两个状态两者之间的差量即为结构实际的安全储备, 反映了结构在遭受意外超载或意外灾害情况下具有的安全冗余。图7所示为一般受弯构件的弯矩 - 曲率关系的示意图, A点为设计目标状态, B点为极限破坏状态。

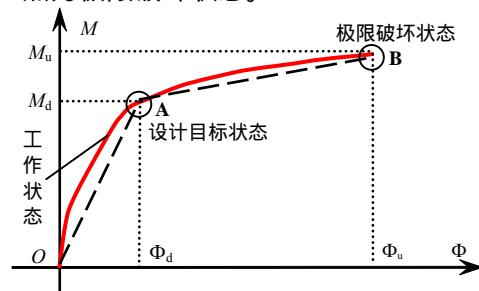


图7 荷载 - 变形曲线上两个关键状态的定义

Fig.7 Two key states on load-deformation curve

对于钢梁和钢筋混凝土适筋梁, 屈服点即为设计目标状态, 变形极限点为破坏极限状态。在钢梁和钢筋混凝土梁的设计方法中, 因为屈服弯矩与极限弯矩相差很小, 所以就可以用极限破坏状态的受力情况来计算构件的承载力, 而以屈服点到极限破坏点的变形能力作为安全储备。因此, 延性系数成为反映传统构件安全储备的重要指标。而采用了新型材料的构件的性能与传统构件的差别很大, 如图8所示, 它们不仅能提供变形上的安全储备, 还能提供承载力上的安全储备, 这就需要定义新的指标来全面科学地反映它们的性能和设计目标状态, 以保证达到极限破坏状态之前具有足够的安全储备。

单一材料组成的构件的破坏极限状态一般是由该材料的极限破坏控制的, 而对于使用多种材料

组成的构件，其破坏极限状态的控制材料和破坏形式可能是多样的，这些都直接影响构件的性能特

点。表1列出了本文研究的受弯构件的常见破坏形式。

表1 受弯构件的破坏形式

Table 1 Flexural members and their failure modes

受弯构件类型	简称	组成	破坏形式	控制材料
钢梁	SB	钢	钢梁边缘达到极限应变	钢
FRP 型材梁	FB	FRP	FRP 梁边缘达到极限应变	FRP
普通钢筋混凝土梁	RC	钢	1.钢筋屈服，混凝土受压边压坏	混凝土，钢
		混凝土	2.钢筋未屈服，混凝土受压边压坏	混凝土
FRP 配筋混凝土梁	FC	FRP	1.FRP 未断裂，混凝土受压边压坏	混凝土
		混凝土	2.FRP 断裂，混凝土未坏	FRP
FRP 预应力混凝土梁 及高强钢丝预应力混凝土梁	PC	预应力 FRP/	1.预应力筋未坏，混凝土受压边压坏	混凝土
		高强钢丝混凝土	2.预应力筋破坏，混凝土受压边未坏	FRP/高强钢丝
FRP 与普通钢筋混合增强的混凝土梁 及 FRP 加固混凝土梁	FSC	FRP	1.FRP 未坏，钢筋未屈服，混凝土受压边压坏	混凝土
		钢	2.FRP 未坏，钢筋屈服，混凝土受压边压坏	混凝土，钢
		混凝土	3.FRP 破坏或剥离，钢筋屈服，混凝土未坏	FRP，钢

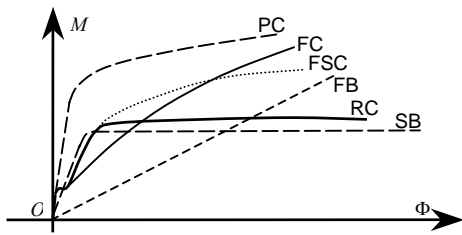


图 8 不同类型受弯构件的弯矩 - 曲率曲线示意

Fig.8 Moment-curvature curves of various flexural members

### 3 性能指标的建议

基于以上讨论，对于受弯构件，本文建议采用以下4个性能指标系数来全面反映各种不同类型构件的受力性能：

$$\text{承载力系数} \quad S = \frac{M_u}{M_d} \quad (13)$$

$$\text{变形性系数} \quad D = \frac{\Phi_u}{\Phi_d} \quad (14)$$

$$\text{变形能系数}(Y\text{指标}) \quad Y = \frac{E_u}{E_d} \quad (15)$$

综合性能系数(F指标)

$$F = D^m \cdot S^n = \left(\frac{\Phi_u}{\Phi_d}\right)^m \left(\frac{M_u}{M_d}\right)^n \quad (m+n=2) \quad (16)$$

其中， $\Phi_u$ ， $M_u$ 和 $E_u$ 为各类构件的破坏极限状态时的曲率(或广义变形)，弯矩(或广义力)和变形能， $\Phi_d$ ， $M_d$ 和 $E_d$ 为构件在设计目标状态时对应的参数。 $m$ 和 $n$ 为根据构件使用状况确定的影响指数，通

常情况下，可以取 $m=n=1.0$ 。当构件使用中超载带来的影响大于变形超限带来的影响时，取 $m<n$ ，提高承载力系数的重要性；反之，取 $m>n$ 。在本文后面的讨论中，不作特殊说明都取 $m=n=1.0$ 。

如果把弯矩 - 挠度曲线近似为两条折线，如图7虚线所示，可将 $E_d$ 近似看作线段OA下面三角形的面积， $E_u$ 近似看作OA下三角形面积与AB下梯形面积之和，则能得到下面的关系：

$$Y = D \cdot S - S + D \quad (17)$$

$$F = (Y + S - D)^m \cdot S^{(n-m)} = (Y + S - D)^n \cdot D^{(m-n)} \quad (18)$$

$$\text{若 } m = n = 1, F = Y + S - D \quad (19)$$

可以看出， $F$ 指标是对变形性、承载力以及变形能的综合体现，成为综合性能系数。

这四个指标分别对应不同的意义。变形性系数 $D$ 反映了构件在变形能力上的安全储备，对于承受冲击荷载、动力荷载以及承受较大确定的活载的结构和构件，在承载力基本不增加时，通常需要有较大的变形储备，此时可以采用变形性系数 $D$ 作为主要控制设计指标。承载力系数 $S$ 则反映了构件承载能力的安全储备，对于以静载为主以及可能会发生超载的结构和构件，可以采用承载力系数 $S$ 作为控制设计指标。变形能系数 $Y$ 反映了构件吸收能量的安全储备，也是一个综合性能的指标，与(9)式中的 $D_{E,ACI}$ 类似，它对于结构抗震以及不同材料的构件间的比较有重要的参考意义。 $F$ 指标也是一个反映构件综合性能的综合指标，与(8)式中 $J$ 指标类似。当其中 $m=n=1.0$ 时， $F$ 为构件变形能与变形余能之和

的比；实际中，工程师可以根据构件的实际情况来调整 $m$ 和 $n$ 的取值，从荷载 - 位移曲线的形状上看，越接近直线的受 $m$ 和 $n$ 的取值影响越小。在工程设计中，这四个系数基本可以全面、合理、科学地反映构件的各方面性能，用以指导设计。

### 4 性能指标分析

#### 4.1 性能指标与安全储备

如前所述，设计目标状态是正常使用的上限，除了其自身所应具有的一般工程意义上的安全性要求外，还要考虑意外超载和意外事件情况下的安全储备。对于传统的钢梁和钢筋混凝土梁，根据以上对设计目标状态的定义，可采用工程中已普遍接受的钢材屈服点作为构件的设计目标状态，并以传统的延性系数来反映安全储备。而对于应用新型材料的结构构件，因为没有明显的屈服点，所以首先需要解决的问题是如何根据性能指标要求确定设计目标状态，使其安全储备程度与传统构件在相同的水平上。本文建议的 4 个性能指标，分别从变形、承载力、变形能以及总体综合性能四个方面反映构件的安全储备。如果对各种类型的构件，取这 4 个性能指标中的一个相等，就能够确定一组构件的设计目标状态在弯矩 - 曲率关系上所对应点，称为设计目标状态点。图 9 为 5 个不同类型的按照正常的设计获得的受弯构件(钢梁、钢筋混凝土梁、预应力钢筋混凝土梁、FRP 配筋混凝土梁和 FRP 梁)的弯矩 - 曲率关系曲线数值计算的结果，并用各自在破坏极限状态时的承载力和变形进行单位化。再以钢梁为参考，取屈服点为其设计目标状态点，依次取 4 个性能指标中的一个相等作为统一条件，确定其它类型受弯构件的设计目标状态点，并计算其它 3 个指标，计算结果列在表 2 中。

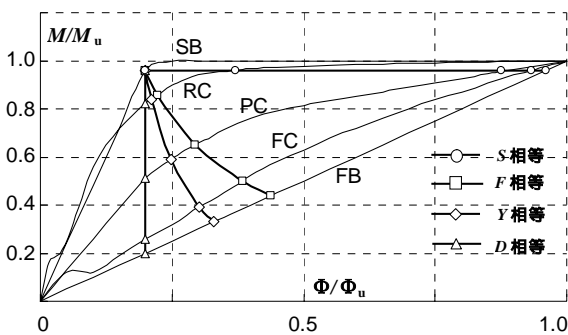


图 9 根据指标相等确定的受弯构件目标设计状态点

Fig.9 Design-aimed state points of flexural members for a given index

表2 受弯构件性能指标计算结果

Table 2 Index values of flexural members

构件类型	SB	RC	PC	FC	FB
$D=5.00$	$D$ <b>5.00</b>	<b>5.00</b>	<b>5.00</b>	<b>5.00</b>	<b>5.00</b>
	$S$ <b>1.04</b>	1.22	1.96	3.88	5.00
	$Y$ <b>9.17</b>	9.90	12.80	20.50	25.00
	$F$ <b>5.21</b>	6.10	9.80	19.40	25.00
$S=1.04$	$D$ <b>5.00</b>	2.69	1.14	1.07	1.04
	$S$ <b>1.04</b>	<b>1.04</b>	<b>1.04</b>	<b>1.04</b>	<b>1.04</b>
	$Y$ <b>9.17</b>	4.46	1.29	1.15	1.09
	$F$ <b>5.21</b>	2.80	1.19	1.12	1.09
$Y=9.17$	$D$ <b>5.00</b>	4.72	4.03	3.30	3.03
	$S$ <b>1.04</b>	1.19	1.70	2.54	3.03
	$Y$ <b>9.17</b>	<b>9.17</b>	<b>9.17</b>	<b>9.17</b>	<b>9.17</b>
	$F$ <b>5.21</b>	5.63	6.83	8.41	9.17
$F=5.21$	$D$ <b>5.00</b>	4.47	3.39	2.60	2.28
	$S$ <b>1.04</b>	1.17	1.53	2.00	2.28
	$Y$ <b>9.17</b>	8.51	7.07	5.81	5.21
	$F$ <b>5.21</b>	<b>5.21</b>	<b>5.21</b>	<b>5.21</b>	<b>5.21</b>

从图表中可以看到，当采用变形性系数  $D$  相等作为安全储备的统一条件时，即令所有构件与钢梁具有相同的变形储备( $D=5$ )时，各种构件的目标设计状态点形成一条垂直线。这时 RC 与 SB 的其它 3 个性能指标相差并不大，不超过 20%，说明对于钢梁和钢筋混凝土梁，延性系数基本能够反映构件的综合性能。而对其它类型的构件，除了  $D$  以外的性能指标相差非常大，如 FB 和 FC 的各项指标为 SB 的 3~5 倍，说明这样定义的设计目标状态点使得 FB、FC 等构件的承载力储备、变形能储备以及整体安全储备都远远超过了传统构件。因此，按照变形性系数  $D$  相等的方法作为超载安全储备的统一条件是不合理的。

当采用承载力系数  $S$  相等作为安全储备的统一条件时，获得的目标设计点在图上为一条水平线。这时尽管所有构件与钢梁具有相同的承载力储备，而 PC、FC 和 FB 的其它各项性能指标都很小，均不超过 1.3，这说明如果按照承载力系数  $S$  相等的方法作为安全储备的统一条件，设计的这些构件的从变形、承载能力以及综合性能上来看，安全储备都很低，也是不合理的。当用变形能系数  $Y$  相等和综合性能系数  $F$  相等作为超载安全储备的统一条件时，PC、FC 和 FB 的变形性系数  $D$  在 2.28~4.03 之间，承载力系数  $S$  在 1.53~3.03 之间，各项指标都较为合理且与 SB、RC 的指标值比较接近，在工程可接受的范围内，这表明用  $Y$  指标或  $F$  指标作为超

载安全储备的统一条件较为合理。

### 4.2 设计目标状态的确定

按照 $Y$ 指标相等和 $F$ 指标相等的条件确定各种类型构件设计目标状态点,再将弯矩-曲率关系曲线以设计目标状态点为基准进行无量纲化处理,可以得到图10和图11所示的曲线。从图中可以清楚地看出这两种方法获得的构件的变形储备和承载力储备的大小。当变形储备减少,则需要增大承载力储备来弥补,这与工程实际经验相吻合。比较图10和11可知,对于PC、FC和FB构件,以变形能系数 $Y$ 相等条件得到的承载能力状态点,其承载力储备和变形储备要比用 $F$ 指标相等条件的结果大一些。

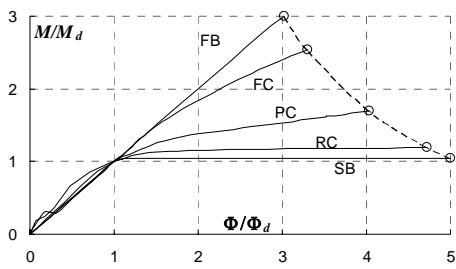


图 10 根据  $Y$  指标相等确定的目标设计状态点

Fig.10 Design-aimed state points for a given  $Y$  factor

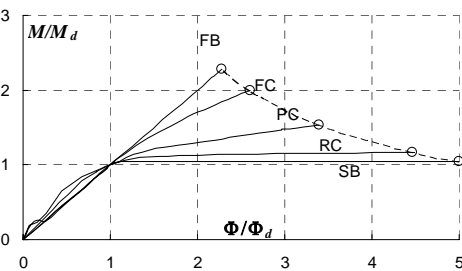


图 11 根据  $F$  指标相等确定的目标设计状态点

Fig.11 Design-aimed state points for a given  $F$  factor

用 $F=5.21$ 计算获得的RC的变形性系数 $D=4.47$ ,与结构设计中钢筋混凝土梁延性的要求吻合;而计算得FB的承载力系数 $S=2.28$ ,这与允许应力设计方法中安全系数的值也很接近。所以用 $F$ 指标来确定构件的设计目标状态,比较符合目前的工程实践。

取 $F=5.21$ 对各种类型的构件试验的荷载位移曲线进行计算,确定其设计状态目标点。计算了来自4个文献的8根受弯构件,包括5种不同的类型,如图12所示。可以看出,对于每个构件,从设计目标状态点到最终极限破坏都有合适的安全储备,并且对于传统的钢筋混凝土梁CB0,计算获得的目标设计状态点与屈服点非常接近。根据确定的设计目标状态点计算其他3个性能参数,见表3。

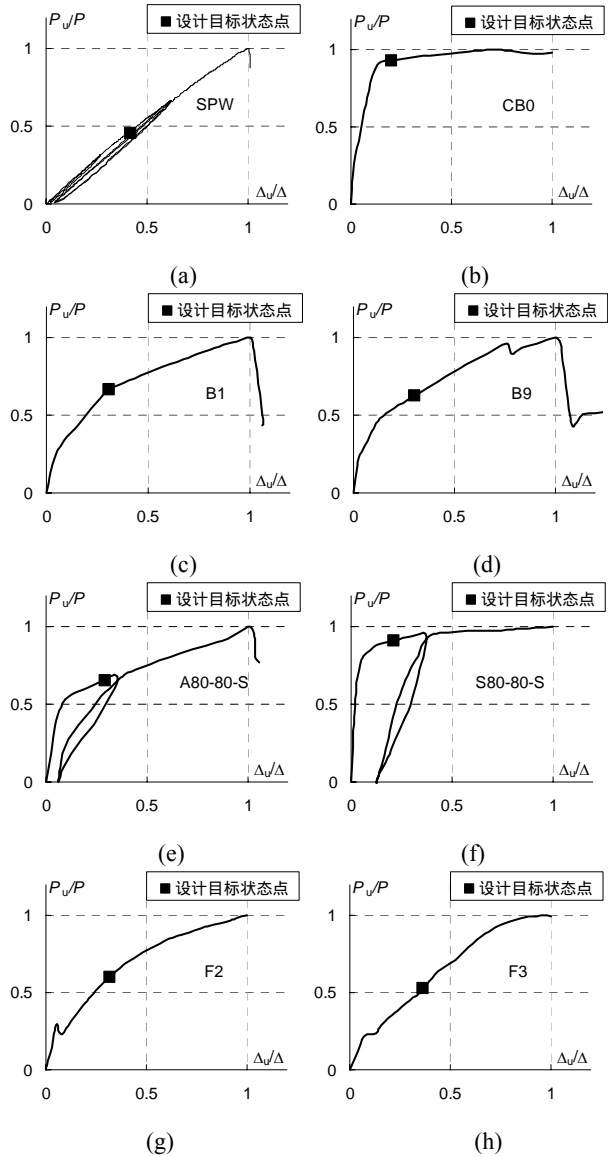


图 12  $F=5.21$  时确定的各试件的目标设计状态点

Fig.12 Design-aimed state points of tested members for  $F=5.21$

表3  $F=5.21$ 时试件性能指标计算结果

Table 3 Indices values of tested members by  $F=5.21$

构件	类型	$F$	$D$	$S$	$Y$	挠度
SPW (文献 2)	FB	5.21	2.37	2.21	5.37	1/92
CB0 (文献 4)	RC	5.21	4.94	1.07	6.58	1/198
B1 (文献 4)	FSC	5.21	3.49	1.49	6.16	1/480
B9 (文献 4)	FSC	5.21	3.28	1.59	4.97	1/220
A80-80-S (文献 3)	PC	5.21	3.41	1.53	4.89	1/194
S80-80-S (文献 3)	PC	5.21	4.75	1.10	5.61	1/153
F2 (文献 17)	FC	5.21	3.14	1.66	5.93	1/280
F3 (文献 17)	FC	5.21	2.73	1.91	5.72	1/287

各种构件的变形能力储备在2.37~4.94之间,承载力储备在1.07~2.21之间,变形能储备在

4.89~6.58之间,都处于合理的范围,且各类构件之间相差不大。因此,说明用 $F$ 指标是能够反映各类构件综合安全储备的一个参数,用它来计算各类构件的设计目标状态点并确定其可利用的承载力是比较合理的。

## 5 结论

(1) 由于新型结构材料的出现,受弯构件的受力性能呈多样化,基于传统构件的单一的延性系数已经不能全面合理地描述各种不同类型构件的受力性能,变形性是代替延性的重要性能指标。

(2) 通过回顾前人的研究,总结了现有各种延性系数、变形性系数以及综合性能系数的定义方法,基本可以分为:广义变形之比、荷载之比、变形能之比以及变形与对应荷载乘积之比。

(3) 提出设计目标状态和极限破坏状态的统一概念,它们之间的比值即为结构和构件在遭受意外超载和意外事件时的安全储备。

(4) 提出了四个性能指标:变形性系数 $D$ 、承载力系数 $S$ 、变形能系数 $Y$ 和综合性能系数 $F$ ,能从多个的角度来全面合理地反映受弯构件的性能和安全储备,同时可以用来确定新型材料构件的设计目标状态点。

(5) 以传统构件为参照,对五种受弯构件的数值计算结果进行分析,发现 $Y$ 指标和 $F$ 指标能从整体上描述各种构件的受力性能,可作为超载安全储备的统一条件,并确定构件的目标设计状态;并且获得了构件的承载力安全储备和变形安全储备之间的关系:当构件的变形储备不够时,可以通过提高承载力弥补,来整体的安全储备的不变。

(6)  $m=n=1$ ,  $F=5.21$ 的条件下,对8根5种类型受弯构件进行了计算,获得了各类构件设计目标状态点。对于传统的RC构件获得的目标设计状态点与屈服点非常接近,而对于其它构件也都处于荷载-变形曲线上合理的位置。

(7) 通过数值计算和试验数据计算, $F$ 指标能够反映受弯构件的综合性能,可以作为统一各类构件整体安全储备的设计参数,并用它来确定设计目标状态点。

### 参考文献:

[1] Naaman A E, Harajli M H, Wight J K. Analysis of ductility in partially prestressed concrete flexural members [J]. PCI Journal, 1986, 31(3): 64~87.  
 [2] Feng P, Ye L P, Zhang L W. Experimental study on

outside filament winding reinforced FRP bridge decks [A]. Proceedings of 4th International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures [C]. Calgary, Alberta, Canada: CSCE, 2004.  
 [3] Zou P X W. Flexural behavior and deformability of fiber reinforced polymer prestressed concrete beams [J]. Journal of Composites for Construction, ASCE, 2003, 7(4): 275~284.  
 [4] 叶列平, 方团卿, 杨勇新. 碳纤维布在混凝土梁受弯加固中抗剥离性能的试验研究[J]. 建筑结构, 2003, 33(2): 61~65.  
 Ye L P, Fang T Q, Yang Y X. Experimental research of flexural debonding performances about RC beam strengthened with CFRP sheets [J]. Building Structures, 2003, 33(2): 61~65. (in Chinese)  
 [5] Mufti A A, Newhook J P, Tadros G. Deformability versus ductility in concrete beams with FRP reinforcement [A]. Proceedings of 2nd International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures [C]. Montreal, Quebec: CSCE, 1996. 189~199.  
 [6] Abdelrahman A A, Tadros G, Rozkalla S H. Test model for the first Canadian smart highway bridge [J]. ACI Structural Journal, 1995, 92(4): 451~458.  
 [7] Thompson K J, Park R. Ductility of prestressed and partially prestressed concrete sections [J]. PCI Journal, 1980, 25(2): 45~69.  
 [8] Park R, Falconer T J. Ductility of prestressed concrete piles subjected to simulated seismic loading [J]. PCI Journal, 1983, 28(5): 112~144.  
 [9] 过镇海. 钢筋混凝土原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999. 294~295.  
 Guo Z H. Reinforced concrete theory [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1999. 294~295. (in Chinese)  
 [10] Naaman A E, Jeong S M. Structural ductility of concrete beams prestressed with FRP tendons [A]. Proceedings of 2nd International RILEM Symposium (FRPRCS-2)[C]. London: E & FN Spon, 1995. 379~401.  
 [11] Jaeger L G, Mufti A A, Macneill D W. Experimental verification of J-factor for steel and GFRP reinforcement in concrete T-beam [A]. Proceedings of Annual Conference of the Canadian Society for Civil Engineering [C]. Sherbrooke, Quebec:CSCE, 1997. 91~100.  
 [12] Bakht B, AL-Bazi G, Banthia N. Canadian bridge design code provisions for fiber-reinforced structures [J]. Journal of Composites for Construction, ASCE, 2000, 4(1): 3~15.  
 [13] ACI Committee 440. Guide for the design and construction of concrete reinforced with FRP bars [S].  
 [14] Tann D B, Delpak R, Davies P. Ductility and deformability of fiber-reinforced polymer strengthened reinforced concrete beams [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Structures & Buildings, 2004, 157(1): 19~30.  
 [15] Van ERP G M. Robustness of fibre composite structures loaded in flexure [A]. Proceedings of international conference on FRP composites in civil engineering [C]. Hong Kong: Elsevier, 2001. 1421~1426.  
 [16] Dolan C W, Hamilton III H R, Bakis C E. Design recommendations for concrete structures prestressed with FRP tendons (DTFH61-96-C-00019) [R]. USA: Federal Highway Administration, 2001.  
 [17] Ana Lilia Orozco, Arup K Maji. Energy release in fiber-reinforced plastic reinforced concrete beams [J]. Journal of Composites for Construction, ASCE, 2004, 8(1): 52~58.