

高强钢筋混凝土梁受弯承载力的安全储备及其经济性分析

叶列平, 林旭川, 冯鹏

(清华大学土木工程系, 北京 100084)

摘要: 随着材料技术的发展, 近年来高强材料已日益在工程结构中得到应用。然而由于高强材料价格较高, 使得其推广应用受到一定影响。另一方面, 从结构受力性能来看, 高强材料的应用可以使得结构的安全储备能力得到很大提高。本文综合不同结构受力性能的特点, 从承载力储备和变形能力储备两方面建议了统一安全储备指标, 并以钢筋混凝土梁的受弯承载力为对象, 对采用不同钢筋品种情况的受弯承载力安全储备及其经济性进行了分析研究, 结果表明高强钢筋的应用在安全储备方面可以获得更为经济合理的设计结果, 这一结果有利于高强钢筋的推广应用。

关键词: 钢筋混凝土梁; 受弯承载力; 高强钢筋; 安全储备; 经济分析

Economic Analysis of the Safety Degree of Reinforced-Concrete Beams

Lin Xuchuan, Ye Lieping, Feng Peng

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

Abstract: As the development of material technology, more and more high-strength materials are applied into the engineering structure. However, the high price of high-strength materials is main factor that counteract its application. But from the view of safety, the application of high-strength materials can great increase safety margin of a structure. In this paper, a uniform safety degree index which includes the strength margin and deformation margin is suggested. Then the proposed uniform safety degree index is used to obtain the efficiency analysis of reinforcement-concrete beams with different strength grades of steel bars. It shows that the application of the high-strength steel reinforcement is more economical than ordinary reinforcement in the view of safety margin for the structure. The results will help the engineer to understand benefits in the promotion of high-strength steel.

Key words: reinforced-concrete beams; flexural strength; high-strength reinforcement bar; safety margin; economic

1 引言

工程结构的安全始终是人们所关注的问题。由于材料强度的离散性、荷载作用的不确定性, 以及可能遭遇的意外事件, 如地震、超载、爆炸、飞行物撞击等, 工程结构设计时均应留有足够的安全储备。从安全角度考虑, 安全储备越大越好; 但从经济性考虑, 安全储备的成本越低越好。为了获得安全储备和经济性之间均衡, 需要综合分析结构材料的价格和构件受力性能。本文以钢筋混凝土梁受弯承载力为对象, 研究不同钢筋品种对安全储备和经济性分析的影响。

2 安全储备的定义和指标

2.1 安全储备指标的说明

安全储备是指结构和构件在遭受意外超载和意外事件时极限破坏状态与设计目标状态的比值。目前, 工程结构的安全储备指标大多采用承载力安全储备系数, 即

$$S = \frac{M_u}{M_k} \quad (1)$$

其中, M_u 和 M_k 分别梁的最大受弯承载力和设计目标状态时的弯矩。根据可靠度分析, 这一安全储备对于

高等学校博士学科点专项科研基金资助课题, 项目编号:

20040003095

正常材料强度离散和正常超载情况,是可以满足预定失效概率的要求^[1]。然而,对于象强烈地震、爆炸和撞击等意外事件^[2],由于目前工程中使用的普通钢材具有较好的延性,通常是利用其延性变形能力予以考虑。这种考虑变形能力安全储备的指标可表示为,

$$D = \frac{\Phi_u}{\Phi_k} \quad (2)$$

其中, Φ_u 和 Φ_k 分别为梁达到破坏时最大曲率和设计目标状态时的曲率。

以图 1 中梁的 $M \sim \Phi$ 关系曲线为例, M_k 、 Φ_k 分别为设计目标状态 A 点的弯矩和曲率; M_u 为曲线最高点 B 处的弯矩; Φ_u 为破坏极限 C 点的曲率。显然,对于普通钢筋混凝土梁,对应 M_u 和 Φ_u 的并不是同一极限状态点。

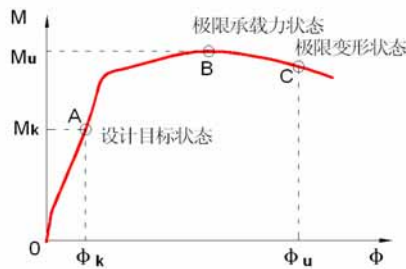


图 1 钢筋混凝土梁 $M-\Phi$ 曲线

由以上的定义可知,承载力安全储备系数 S 反映了构件相对于设计目标承载力的安全储备程度。变形性安全储备系数 D 反映了构件相对于设计目标变形的安全储备程度。然而,由图 1 可知,结构或构件的安全储备应该同时包括承载力安全储备和变形安全储备,即应同时考虑极限状态时承载力和变形能力相对于设计目标状态的承载力和变形安全储备,只用其中一个是不能全面反映安全储备的程度。比如,一个具有承载力安全储备系数 $S=2$ 和变形能力安全储备系数 $D=2$ 的弹性结构,其安全储备程度与承载力安全储备系数 $S=1.3$ 和变形性安全储备系数 $D=4$ 的弹塑性结构,两者的安全储备程度无法简单用这两个系数进行评价和比较,还需要进一步考虑结构的荷载特征。对于超载程度较大荷载情况,采用承载力安全储备系数 S 更为合适,因为此时变形性储备对超载无任何意义。而当考虑结构遭受以外冲击荷载时,则采用变形能力安全储备系数 D 较为合适,因为延性对于缓

解冲击作用更由意义。不过,应该注意的是,尽管延性可以缓解冲击作用效应,但同时具有足够的承载力安全储备依然十分重要,这将在以下分析中可以看到。

2.2 等效承载力安全储备系数

由于安全储备系数 S 和 D 不能同时全面反映结构或构件在承载力和变形两个方面的安全储备程度,需要进一步考虑引入更合理的安全储备系数。文献[3]建议采用以下两个指标来综合衡量受弯构件的安全储备:

$$\text{变形能安全储备系数 } Y = \frac{E_u}{E_k} \quad (3)$$

$$\text{综合性安全储备系数 } F = D^m \cdot S^n \quad (4)$$

其中, E_k 为设计目标状态时变形能,即图 1 中 OA 曲线下的面积; E_u 为构件在达到构件破坏时的最大变形能,即图 1 中曲线 OABC 下的面积; $m+n=2$, m 、 n 为根据使用情况设定的权重系数。

变形能安全储备系数 Y 反映了构件吸收能量的安全储备; F 指标综合反映了承载力和变形的安全储备,通过调节指数 m 和 n 的大小来体现结构或构件对承载力安全储备和变形性安全储备的需求权重^[3]。

以上四个安全储备指标比较全面的包含了安全储备的各个方面,针对不同的情况使用不同的指标。对于理想线弹性材料来说,用这四个指标衡量安全储备的大小,其结果是一致的。

尽管 Y 指标和 F 指标能够较好反映结构或构件在承载力和变形能力两方面的综合安全储备程度,但 Y 指标不便于直接反映安全储备的工程概念;而 F 指标只是将 S 指标和 D 指标简单相乘,没有明确的物理意义和解释。为此,本文提出以下等效承载力安全储备系数,

$$S_{eq} = \frac{Y}{D} \quad (5)$$

图 2 为不同弹塑性受力性能的弯矩 - 曲率关系曲线,其中 B 点为设计目标状态点。图中的弯矩 - 曲率关系曲线是以 B 点的承载力和变形为基准进行标准化给出的,即极限状态点的承载力值就是 S 指标,变形值就是 D 指标。对于图 2 中 OC 直线所示的线弹性结构,根据式(5)的定义, S_{eq} 即等于承载力安全储备系数 S 。

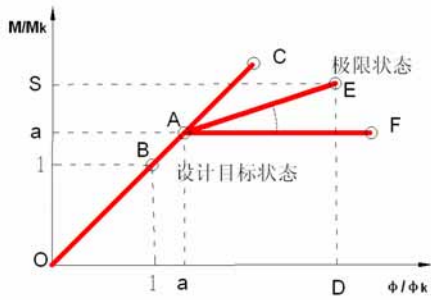


图2 不同受力特性的弯矩 - 曲率关系曲线

图2中OBAE为弹塑性弯矩 - 曲率关系曲线,这种关系曲线是高强材料结构所常见的,其中A点为屈服点,E点为破坏极限状态点。A点相对于B点的承载力储备系数为 a ,AE段斜率与OA段斜率之比为 k ,则由式(5)定义可得OBAE弹塑性结构或构件的等效承载力安全储备系数 S_{eq} 为,

$$S_{eq} = \frac{2aD - a^2 + (D - a)^2 k}{D} \quad (6)$$

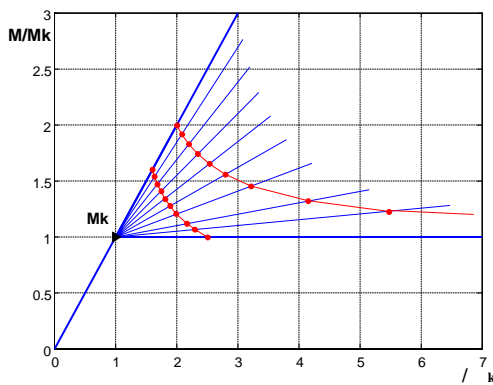


图3 $a=1$ 时的等效承载力安全储备

对于理想弹塑性的情况, $k=0$,此时若取 $a=1$,即设计目标状态与屈服状态一致,则由式(6)可得,

$$S_{eq} = 2 - \frac{1}{D} \quad (7)$$

由上式可知,当 $S_{eq}=2$ 时, $D \rightarrow \infty$,见图3。这是一个十分有趣的结果。我们知道,对于材料力学所讨论的线弹性结构,安全系数通常取2.0。如果取按安全系数2.0情况下的设计目标点作为结构的屈服点,将结构改为理想弹塑性结构,则变形能力安全储备系数 D 要求无限大,即意味着在设计目标点屈服的结构,其延性需无穷大才能满足传统经典线弹性结构的承载力安全储备系数等于2的需要。这从另一个方面

说明了经典线弹性结构安全度的工程意义。

对于弹塑性结构,基于正常使用情况下的承载力安全储备的考虑,不可能在设计目标状态下让结构达到屈服。通常要求结构的屈服承载力应高于设计目标时的承载力,即比值 $a > 1$,本文称 a 为基本承载力安全储备系数。这一安全储备系数具有重要的工程意义。事实上,目前对于目前工程中常用的钢筋混凝土和钢这类弹塑性材料的结构,按我国工程结构设计规范确定的基本承载力安全系数 a 约为1.25(根据文献[1]中承载能力极限状态分项系数的规定,恒载分项系数一般取1.2,活载分项系数一般取1.4,考虑活载与恒载的比例1:3,则基本安全储备系数 $a=1.25$)。图4表示 $a=1.25$ 、 $S_{eq}=1.9$ 的不同弹塑性结构的极限状态点。由图可见,利用等效承载力安全储备系数 S_{eq} ,可较好的统一结构或构件在承载力和变形能力两方面的安全储备程度,且 S_{eq} 指标与传统线弹性结构的承载力安全储备概念一致,便于工程理解。

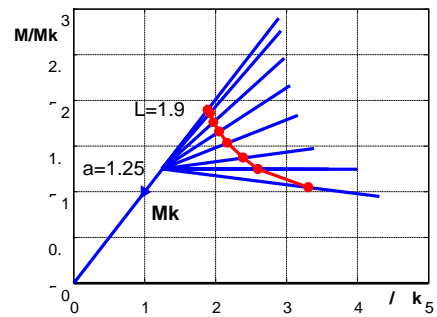


图3 $a=1.25$, $S_{eq}=1.9$ 的极限状态点

另一方面,采用基本承载力安全系数 a 和等效承载力安全储备系数 S_{eq} ,可以使得工程结构的安全储备具有更明确的物理意义和工程意义。基本承载力安全系数 a 主要解决结构或构件在正常使用情况下的荷载超载和材料强度离散的情况,可以通过合理的统计分析获得相应的失效概率。而对于意外事件,通常无法采用统计方法获得荷载或作用的量值及其相应的概率,往往需要工程师根据长期工程积累,凭借经验把握确定。

3 基于 S_{eq} 的经济性分析

众所周知,钢筋混凝土梁的受弯承载力随钢筋强度的提高而增加。近年来,随着材料技术的发展,钢

筋的强度已有很大提高，而价格并不是随强度增加的比例而提高。下面基于 S_{eq} 指标对采用不同强度钢筋的单筋矩形截面梁进行经济性分析。

3.1 构件破坏的定义

根据钢筋混凝土梁的正截面受弯性能，本文对其破坏定义如下，即当满足下列条件之一者，认为达到正截面破坏：

- 1) 受压区边缘混凝土的应力过其峰值应力后下降到 $0.5f_c$ ；
- 2) 受拉钢筋应变达到0.01；
- 3) 受弯承载力过峰值后下降到峰值的 85%。

以上三个条件分别是以混凝土材料的极限破坏、截面的极限变形和截面承载力的衰减百分数来进行控制的。

3.2 计算说明

1) 弯矩设计值取 $M_k=200\text{kN.m}$ ，基本安全承载力系数 $a=1.25$ ，等效承载力安全储备系数 $S_{eq}=2.5$ 。

2) 截面应变分布符合平截面假定。混凝土应力应变关系曲线采用过镇海曲线^[5]，钢筋应力应变关系采用理想弹塑性模型。

3) 钢材选用 HRB335、HRB400、HRB500、1860 级钢绞线；混凝土选用 C20、C30、C40。不同强度钢筋的价格取北京市场 2005 年 7 月到 11 月的平均价格，见表 1。由于不同强度混凝土的价格变化不大，不考虑混凝土价格的影响。

4) 钢筋混凝土梁截面尺寸为 250×500 ，仅按单筋截面计算，钢筋中心到梁底面距离为 35mm。

根据以上条件，经济性分析的计算过程如下：选定混凝土强度和钢材强度的一种组合，通过改变配筋率使其等效承载力安全储备满足 $S_{eq}=2.5$ ，得到相应配筋率 ρ ，并计算相应的所用钢材总价。

表 1 钢筋价格

钢材型号	HRB335	HRB400	HRB500	钢绞线 1860
平均钢价/元	3090	3225	3450	4500

表 2 构件破坏模式

破坏原因	HRB335	HRB400	HRB500	钢绞线 1860
C20	混凝土	混凝土	混凝土	混凝土
C30	钢筋	钢筋	钢筋	混凝土
C40	钢筋	钢筋	钢筋	混凝土

表 3 $a=1.25, S_{eq}=2.5$ 时的截面配筋率

配筋率	HRB335	HRB400	HRB500	钢绞线 1860
C20	1.80%	1.54%	1.30%	1.23%
C30	1.66%	1.42%	1.16%	0.73%
C40	1.64%	1.41%	1.15%	0.48%

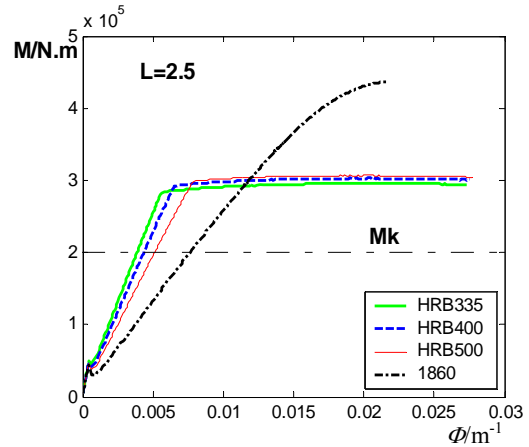


图 6 $M - \phi$ 曲线(C30)

图中 L 改为 S_{eq}

3.3 计算结果分析

根据前述破坏定义，按以上方法计算得到不同混凝土和钢筋组合截面的破坏模式见表 2，所需配筋率见表 2。图 6 为 C30 混凝土与不同钢材组合得到的截面弯矩 - 曲率关系曲线，图中不同强度等级钢材所对应的设计结果具有相同的基本承载力储备 $a=1.25$ 和等效承载力安全储备 $S_{eq}=2.5$ 。由图 6 可见，对于配置 HRB33、HRB400 和 HRB500 级热轧钢筋的情况，其极限承载力和极限变形基本相同，对于配置 1860 级高强钢绞线的情况，其极限承载力远高于配置普通热轧钢筋的极限承载力，但极限变形要小于热轧钢筋情况。也就是说，采用 1860 级高强钢绞线可以通过承载力的提高来换取延性，从而获得相同的等效承载力安全储备 $S_{eq}=2.5$ 。另一方面，由图 6 还可见，1860 级高强钢绞线梁的变形能 E_u 和破坏时的总变形能力 ϕ_u 与一般热轧钢筋梁的情况差距不大。因此，对于采用传统延性概念来评价结构的安全程度是不全面的，也不符合高强材料的发展和利用。

以 HRB335 钢筋与 C20 混凝土组合所得的钢材总价 P_0 为基准，对各种钢筋和混凝土组合的总价 P 进行规一化处理，结果见图 7，该图反映了使用不同强度等级钢筋的经济性。由图可知，在满足同样的等效

承载力安全储备 ($S_{eq} = 2.5$) 的条件下, 钢材强度等级越高, 经济性越好。如使用 C40 混凝土和 1860 级钢绞线组合时, 钢材的总价不到使用普通热轧钢筋总价的一半。

图 7 中不同钢材与 C20 混凝土组合时, P/P_0 曲线先下降, 而到 1860 高强钢绞线时又突然升高接近 1.0。这是由于 C20 混凝土和 1860 级高强钢绞线组合时, 混凝土强度过低, 而钢绞线的强度很高, 因混凝土过早破坏而达到破坏状态, 钢材的强度利用不充分。这表明, 高强钢材应与高强混凝土配合才能充分发挥其综合经济效益。

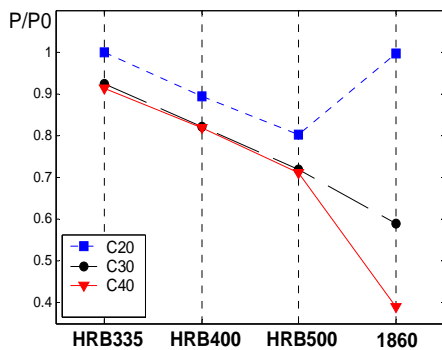


图 7 各种组合的经济性比较

4 关于安全储备经济性的讨论

从图 6 还可知, 随着钢筋强度等级的提高, 在正常使用阶段截面抗弯刚度不断降低。由钢筋混凝土截面抗弯刚度的分析可知, 抗弯刚度基本与截面配筋面积成正比。也就是说, 如果要使得采用不同强度等级钢筋的截面具有相同的截面抗弯刚度, 配筋面积基本一致。因此, 如以截面抗弯刚度作为设计的控制因素, 则采用高强钢筋的经济性自然不好。

不过, 本文是从安全储备角度分析经济性。由前面的分析可知, 在同样的安全储备前提下, 采用高强钢筋具有更好的经济性。由本文前述 2.2 研究可知, 结构的安全储备可分为基本承载力储备和等效承载力储备。基本承载力储备是对应结构在正常使用情况的安全储备, 对于普通热轧钢筋混凝土梁, 其含义是在正常使用情况下, 由于正常使用荷载的超载和材料强度的离散性, 达到或超过屈服弯矩 (对于配置热轧钢筋情况, 屈服弯矩基本等于极限弯矩) 的概率小于容许失效概率。而当结构遭受意外事件, 如地震、爆

炸等, 对于普通热轧钢筋混凝土梁, 则需要利用其屈服以后的延性来作为安全储备; 而对于高强钢筋混凝土梁, 则由其可持续提高的承载力及其相应的变形能力来作为安全储备。也就是说, 本文所提出的等效承载力储备概念对于结构抵御意外事件具有重要意义。因此, 从这个角度来看, 利用高强钢材来提高结构的安全储备更具有实际意义和更好的综合经济性。

5 结语

本文根据不同受力特性, 提出了能够同时考虑承载力安全储备和变形能力按储备的统一安全储备指标——等效承载力安全储备指标 S_{eq} 。通过对 S_{eq} 指标的分析进一步指出: 目前规范规定的安全储备属于正常使用情况的基本安全储备, 而结构在遭遇意外事件时, 则需要具备足够的等效承载力安全储备指标 S_{eq} 。

论文基于 S_{eq} 指标对钢筋混凝土梁受弯承载力安全储备的经济性进行了分析, 结果表明, 使用高强钢筋时具有较高的安全度储备经济性, 即当结构遭遇意外时, 采用高强材料具有更好的安全度储备经济性。

虽然从承载力角度来说, 混凝土梁中使用高强钢筋具有较好的经济性, 但也存在着在正常使用阶段构件变形相对较大。本文建议在使用钢绞线等高强材料时, 采用预应力的方法减小正常使用阶段的变形, 并应采用高强混凝土与之配合, 以体现其综合经济效益。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国家标准, 《建筑结构可靠度设计统一标准 GB50068 - 2001》, 中国建筑工业出版社, 2001, 北京
- [2] 叶列平等, 简论结构抗震的鲁棒性, 《第十届高层建筑抗震技术交流会论文集》, 2005 年, 广州, 37-43
- [3] 冯鹏, 叶列平, 黄羽立. 受弯构件的变形性与新的性能指标的研究[J]. 工程力学, 2005, (06):28-36
- [4] 过镇海, 时旭东. 钢筋混凝土原理和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [5] 中华人民共和国国家标准, 《混凝土结构设计规范 GB50068 - 2002》, 中国建筑工业出版社, 2002, 北京
- [6] 麻洪波. 国内外混凝土结构规范安全储备的比较[J]. 内蒙古煤炭经济, 2002, (04):30-31