

高强混凝土构件正截面承载力计算方法

叶列平 庄崖屏 吴佩刚 冯鹏 沈悦

(清华大学)

摘要 根据近年来国内外高强混凝土的研究成果,总结了高强混凝土强度指标的换算关系,提出正截面承载力计算用的高强混凝土受压应力-应变曲线。根据该关系曲线分析了高强混凝土构件的正截面承载力,建议了应力-应变曲线参数的取值。在此基础上,进一步给出了等效矩形应力图形系数。

关键词 高强混凝土 正截面 承载力 应力-应变曲线 等效矩形应力图

近年来,随着我国高强混凝土材料、结构和施工技术研究的不断深入,高强混凝土的应用已十分广泛^[1-8]。目前工程中C80级商品混凝土已开始应用。根据高强混凝土在我国的发展,相应设计规程和规范的制定也十分迫切。中国土木工程学会高强混凝土委员会于1994年编制出版了《高强混凝土结构设计与施工指南》^[9],适应了当时我国高强混凝土应用的需要,对推动我国高强混凝土的发展起到重要的作用。1998年,中国工程建设标准化协会在该指南的基础上,编制了《高强混凝土结构设计与施工规程CECS104:99》^[10]。与此同时,我国国家标准《混凝土结构设计规范GBJ10—89》^[11]的修订也已确定将混凝土强度等级提高到C80级。这必将进一步推动我国高强混凝土的应用。

高强混凝土构件正截面计算方法,是结构设计中的重要部分。随着混凝土强度等级的提高,混凝土强度指标间的换算关系、应力-应变曲线以及原有普通混凝土正截面承载力的计算方法能否适用于高强混凝土,以及由此带来的一系列问题的处理和计算方法的可靠程度,都需要进行研究。

1 混凝土强度指标的换算关系

1.1 立方体强度间的换算

试验及实际工程中常采用边长为100mm立方体试件测定高强度混凝土的强度。而现行《规范GBJ10—89》规定的混凝土强度等级是按边长为150mm标准立方体试件测定的。对普通强度等级(<C50级)混凝土,现行《规范GBJ10—89》给出的两种立方体试件强度平均值间的换算关系为,

$$f_{cu,m}^{150} = 0.95f_{cu,m}^{100} \quad (1)$$

式中, $f_{cu,m}^{150}$ 为边长150mm立方体强度的平均值; $f_{cu,m}^{100}$ 为边长100mm立方体强度的平均值。

虽然实验结果不完全一致,但多数试验结果表明^[1,2,13],随混凝土强度的提高,式(1)中的换算系数0.95有所降低。当 $f_{cu,m}^{100} = 100\text{MPa}$ 时,换算系数约为0.9。按C50级混凝土的换算关系与现行《规范GBJ10—89》衔接,相应C50级混凝土100mm立方体强度的平均值为 $\frac{50}{0.95(1-1.645\delta)} = 64.26\text{MPa}$ (对C50级混凝土变异系数 $\delta = 0.11$),近似取为65MPa。则换算系数在 $f_{cu,m}^{100} = 65\text{MPa}$ 时的0.95到 $f_{cu,m}^{100} = 100\text{MPa}$ 时的0.9之间线性插值,得,

$$f_{cu,m}^{150} = \left[0.95 - \frac{0.01}{7} (f_{cu,m}^{100} - 65) \right] f_{cu,m}^{100} \quad (2)$$

1.2 棱柱体强度与立方体强度的关系

现行《规范GBJ10—89》给出的棱柱体强度与立方体强度平均值之间的关系为,

$$f_{c,m} = kf_{cu,m} = 0.76f_{cu,m} \quad (3)$$

式中, $f_{c,m}$ 为棱柱体强度平均值; $f_{cu,m}$ 为150mm标准立方体强度平均值。

随着混凝土强度的提高,式(3)中的换算系数 k 值将增大。李家康^[12]由试验资料统计得在 $f_{cu,m} = 50 \sim 90\text{MPa}$ 范围内棱柱体强度与立方体强度平均值之间的关系为,

$$f_{c,m} = 1.015f_{cu,m} - 12.31 \quad (4)$$

上海建研院^[13]由试验资料统计得 $f_{cu,m} = 60 \sim 110\text{MPa}$ 范围内 $f_{c,m}$ 与 $f_{cu,m}$ 的关系为,

$$f_{c,m} = 0.89f_{cu,m} - 3.80 \quad (5)$$

上述两式关系用换算系数 k 值表示见图1,可见式(4)在 $f_{cu,m} = 50\text{MPa}$ 时与普通强度混凝土的 $k = 0.76$ 值衔接较好,但在 $f_{cu,m}$ 超过70MPa时 k 值偏大。而式(5)则相反。按式(5)计算, $f_{cu,m} = 90\text{MPa}$ (相当于C80级)时, $k = 0.848$,与文献[1,2]国内外

收稿日期:1999-09-19,收到修改稿日期:2000-03-14

大多数试验结果较为一致。为此建议,取 $f_{cu,m} = 50\text{MPa}$ 时 $k = 0.76$ 到 $f_{cu,m} = 90\text{MPa}$ 时偏保守的取 $k = 0.84$, 其间线性插值, 得

$$f_{c,m} = (0.66 + 0.002f_{cu,m}) f_{cu,m} \quad (6)$$

上式的结果也绘于图1中。

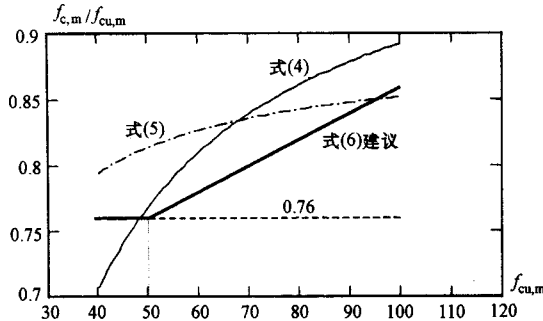


图1 棱柱体强度与立方体强度的关系

1.3 混凝土强度标准值 $f_{cu,k}$ (强度等级)

现行《规范 GBJ10—89》规定混凝土强度等级是取保证率不小于 95% 的立方体强度, 即为立方体强度标准值,

$$f_{cu,k} = f_{cu,m} (1 - 1.645\delta) \quad (7)$$

式中 δ 为变异系数。参照现行《规范 GBJ10—89》背景材料, $f_{cu,m} = 55\text{MPa}$ (相当于 C44 级) 时取 $\delta = 0.12$ 。随混凝土强度的提高变异系数 δ 有所减小^[1,17], 建议 $f_{cu,m} = 90\text{MPa}$ 时取 $\delta = 0.08$, 其间按线性插值确定变异系数。

2 混凝土应力-应变关系

现行《规范 GBJ10—89》的正截面承载力计算是采用基于平截面假定的计算理论。该计算理论是目前国际公认成熟的计算理论, 各国规范都基本采用。基于该计算理论建立的正截面统一计算方法可适应各种复杂截面形状, 双向压弯、拉弯, 多排钢筋, 箍筋约束混凝土等多种情况, 也便于采用一般计算方法编制有关计算程序。

基于平截面假定的正截面承载力计算理论, 需给出混凝土受压应力-应变关系曲线。关于高强混凝土受压应力-应变关系曲线研究很多^[14-16], 其中以 MC90 混凝土模式规范^[17] 建议的曲线形式较为简便适用, 其公式如下

$$\text{上升段: } \sigma_c = f_c \left[1 - \left(1 - \frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} \right)^n \right] \quad \epsilon_c \leq \epsilon_0 \quad (8a)$$

$$\text{下降段: } \sigma_c = f_c \quad \epsilon_0 < \epsilon_c \leq \epsilon_{cu} \quad (8b)$$

上式中当取 $n = 2$ 、 $\epsilon_0 = 0.002$ 、 $\epsilon_{cu} = 0.0033$, 则与我国现行《规范 GBJ10—89》的公式一致。MC90 模式

规范对高强混凝土建议取,

$$\left. \begin{aligned} n &= 2 - 0.008 (f'_{c,k} - 50) \\ \epsilon_0 &= 0.002 + 0.5 (f'_{c,k} - 50) \times 10^{-5} \\ \epsilon_{cu} &= 0.0025 + 0.002 \left(1 - \frac{f'_{c,k}}{100} \right) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中, $f'_{c,k}$ 为圆柱体强度(相应式(8)中的 f_c 在 MC90 中取为 $0.85f'_{c,k}$)。由 $f'_{c,k}$ 改为我国的混凝土强度等级 $f_{cu,k}$, 不能直接套用式(9), 有关参数的取值范围有待与试验结果对比后确定。根据有关文献[9, 14~16]和国外有关规范[18, 19]的分析, 对参数 n 、 ϵ_0 和 ϵ_{cu} 考虑了表1所示的四种取值方案, 表中 C50~C80 之间的参数按线性插值取值。由表中数值可见, 方案二、三界于方案一、四之间。因此, 以下分析着重于方案一、四。

表1 应力应变曲线参数方案

参数方案	应力应变曲线参数	C50	C80
方案一	n	2.0	1.7
	ϵ_0	0.002	0.00215
	ϵ_{cu}	0.0033	0.003
方案二	n	2.0	1.4
	ϵ_0	0.002	0.0021
	ϵ_{cu}	0.0033	0.0029
方案三	n	2.0	1.7
	ϵ_0	0.002	0.00215
	ϵ_{cu}	0.0033	0.0027
方案四	n	2.0	1.4
	ϵ_0	0.002	0.00215
	ϵ_{cu}	0.0033	0.0027

3 与试验结果的对比

文献[20]汇总了我国高强混凝土偏心受压短柱正截面承载力的试验资料。该试验资料是编制《高强混凝土结构与施工指南》和《规程 CECS104:99》的依据。本文采用基于平截面假定的正截面承载力计算的一般方法, 按前述高强混凝土材料强度指标换算关系, 以及建议的应力-应变关系方案一、四, 对文献[20]中大于 C50 级以上的 64 个试验结果进行了计算对比分析, 有关统计数据见表2, 相应于参数 e_0/h 、 $N_1/f_{c,m}bh_0$ 和 $f_{cu,k}$ 的试验范围以及试验结果与计算结果比值的离散情况分别见图3。总体看来, 方案四与试验结果吻合较好, 且比方案一偏于安全。因此建议采用上述方案四的应力-应变曲线参数, 即 n 、 ϵ_0 和 ϵ_{cu} 的取值如下,

$$\left. \begin{aligned} n &= 2 - 0.02 (f_{cu,k} - 50) \leq 2 \\ \epsilon_0 &= 0.002 + 0.5 (f_{cu,k} - 50) \times 10^{-5} \geq 0.002 \\ \epsilon_{cu} &= 0.0033 - 2 (f_{cu,k} - 50) \times 10^{-5} \leq 0.0033 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

对各强度等级, 上式计算结果列于表3。

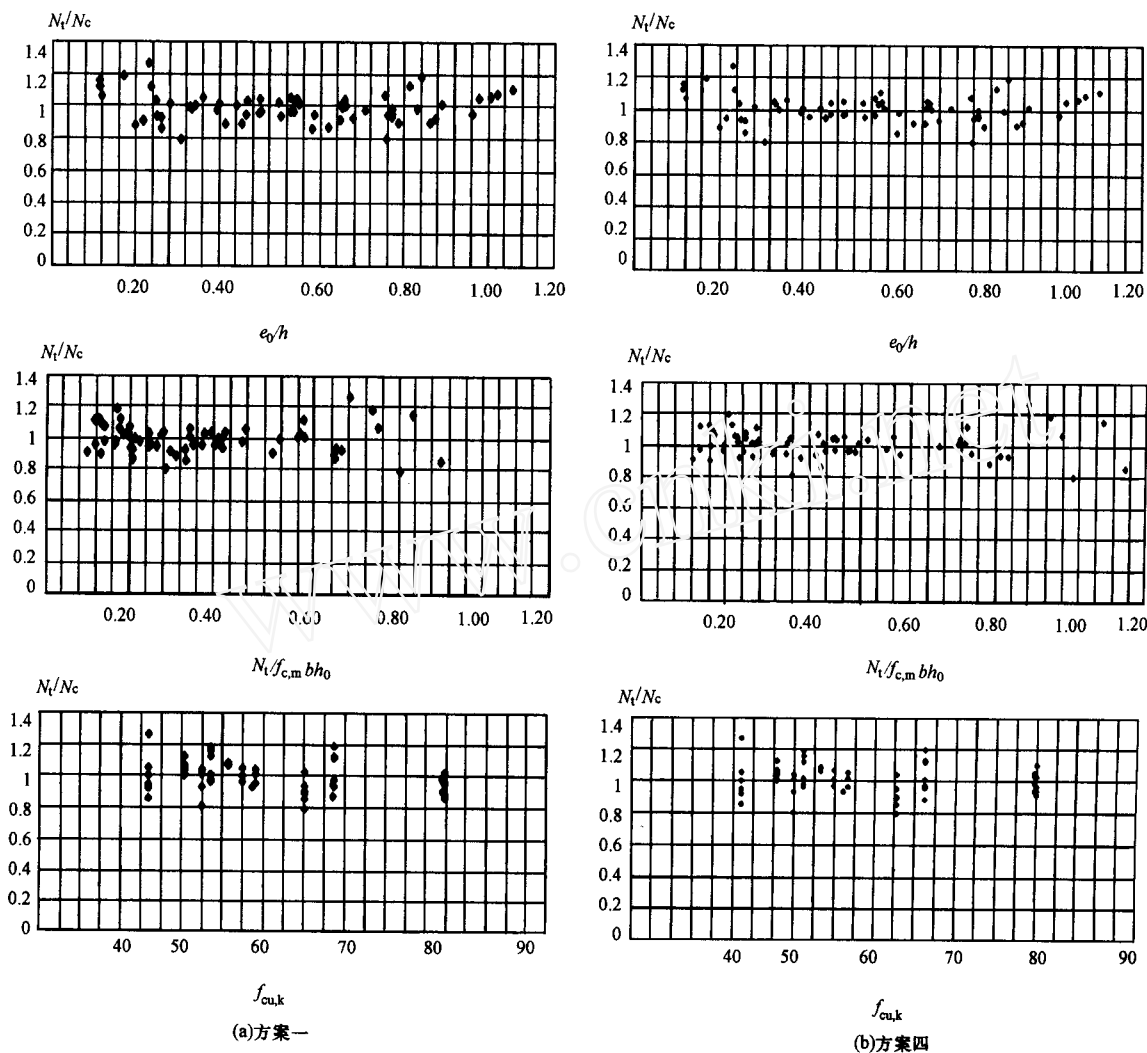


图3 试验值与计算值的对比

表2 理论计算结果与试验结果对比的统计结果

应力-应变 曲线方案	N_t/N_c	混凝土立方强度标准值 $f_{cu,k}$			总体统计
		50~60	60~70	70~80	
	数量	32	20	12	64
方案一	平均值	1.025	0.964	0.959	0.994
	均方差	0.091	0.097	0.049	0.090
	最大值	1.264	1.188	1.031	1.264
	最小值	0.806	0.794	0.908	0.794
方案四	平均值	1.028	0.980	1.002	1.008
	均方差	0.091	0.096	0.055	0.088
	最大值	1.268	1.196	1.108	1.268
	最小值	0.807	0.801	0.946	0.801

表3 建议高强混凝土应力-应变曲线参数取值

强度等级	C50	C60	C70	C80
n	2	1.8	1.6	1.4
ϵ_0	0.002	0.00205	0.0021	0.00215
ϵ_{cu}	0.0033	0.0031	0.0029	0.0027

4 等效矩形应力图形系数

在正截面承载力的实用计算中，受压区混凝土的应力分布可取等效矩形应力图。等效矩形应力图的概念见图4，图中 α 和 β 称为等效矩形应力图形系数。按前述建议的高强混凝土应力-应变关系式(8)和式(10)，根据等效原则确定的等效矩形应力系数见表4。

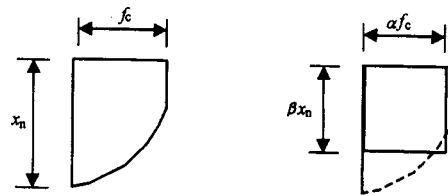


图4 等效矩形应力图

表 4 等效矩形应力图形系数

$f_{cu,k}$	C50	C60	C70	C80
α	0.969	0.957	0.938	0.908
β	0.824	0.798	0.769	0.736
$\alpha\beta$	0.798	0.764	0.721	0.668

由表 4 可见, 等效矩形应力图形系数 α 和 β 随混凝土强度的提高而减小。因此, 对于高强混凝土继续取现行《规范 GBJ10—89》的 $\alpha = 1.0$ 和 $\beta = 0.8$ 将给计算结果带来较大偏于不安全的误差。国外的研究也认为普通混凝土的等效矩形应力图形系数不能继续适用于高强混凝土, 表 5 列出了有关国家规范或研究者建议的 (相当于我国 C50 ~ C80 级) 高强混凝土等效矩形应力图形系数。

表 5 国外高强混凝土等效矩形应力图形系数

加拿大标准 [21]	f'_c	40	50	60	70
$\alpha = \frac{(0.85 - 0.0015f'_c)}{0.85} \geq 0.79$	α	0.929	0.912	0.894	0.876
$\beta = (0.97 - 0.0025f'_c) \geq 0.67$	β	0.87	0.845	0.82	0.795
	$\alpha\beta$	0.808	0.771	0.733	0.696
Ibrahim 等建议 [22]	f'_c	40	50	60	70
$\alpha = \frac{(0.85 - 0.00125f'_c)}{0.85} \geq 0.85$	α	0.941	0.926	0.912	0.897
$\beta = (0.95 - 0.0025f'_c) \geq 0.70$	β	0.85	0.825	0.8	0.775
	$\alpha\beta$	0.8	0.764	0.729	0.695
J. G. MacGregor 给 ACI 的建议 [23]	f'_c	40	50	60	70
$\alpha = \frac{(0.9 - f'_c/600)}{0.85} \geq 0.9$	α	0.98	0.961	0.941	0.922
$\beta = (0.91 - f'_c/500) \geq 0.70$	β	0.83	0.81	0.79	0.77
	$\alpha\beta$	0.813	0.778	0.744	0.710
Thorenfeldt 等 1987 年论文 [24]	$f_{cu,10}$	55	65	75	85
	α	0.965	0.958	0.945	0.914
	β	0.806	0.784	0.764	0.722
	$\alpha\beta$	0.778	0.751	0.722	0.66

根据文献 [20] 试验结果及量测的受拉侧钢筋应变, 可直接反算等效矩形应力图形系数的 α 值。各强度等级范围 α 值的平均值见表 6, 可见 α 值随混凝土强度等级的提高有减小趋势。此外, α 值随相对受压区高度 ξ 的增加也有减小趋势。对于实测受拉钢筋应变 $\epsilon_s \leq \epsilon_y$ 的界限破坏和小偏压破坏的共 35 个试件, α 值的平均值为 0.940。

表 6 等效矩形应力图形系数 α 值的反算值

强度等级范围	C50 ~ C60	C60 ~ C70	C70 ~ C80
α	1.057	0.987	0.883

综上所述, 对于高强混凝土, 当采用等效矩形应

力图进行正截面承载力计算时, 应考虑图形系数随混凝土强度的提高而减小。《高强混凝土结构设计指南》和《规程 CECS104: 99》中的系数 α 统一取 1.0, 系数 β 取实际图形系数 α 和 β 的乘积。这样处理, 在实用上较为简便, 但由于 β 取值比实际 β 值偏低, 故在钢筋应力计算时会产生误差, 影响承载力计算的准确性。但这种误差在 C80 以下时较小。考虑到高强混凝土今后的发展, 取两个图形系数 α 和 β 均随强度提高而减小的方案较为合理。因此, 根据表 4 结果, 并参列表 5, 建议高强混凝土等效矩形应力图形系数取值如表 7。

表 7 建议等效矩形应力图形系数

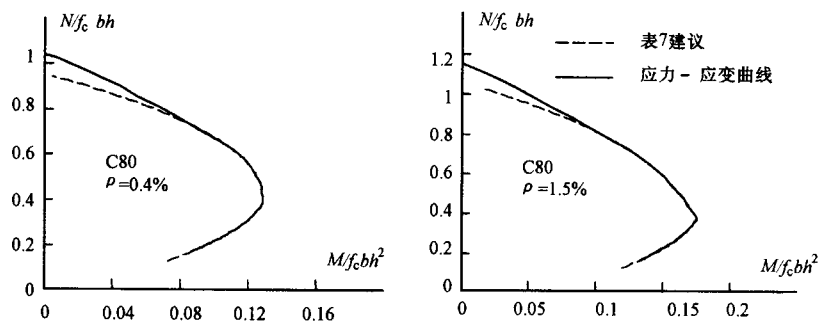
$f_{cu,k}$	C50	C60	C70	C80
α	1.0	0.97	0.94	0.91
β	0.8	0.78	0.76	0.74
$\alpha\beta$	0.8	0.757	0.714	0.673

表 8 为按表 7 建议的等效矩形应力图形系数, 计算文献 [20] 中 64 个高强混凝土短柱的计算结果与试验结果对比的统计结果, 与表 2 方案四的总体统计结果基本一致。表 8 中同时列出了按《规程 CECS104: 99》等效矩形应力图形系数的计算结果与试验结果对比的统计结果。可见, 总体吻合情况也可以, 但比表 7 建议的略偏于不安全。

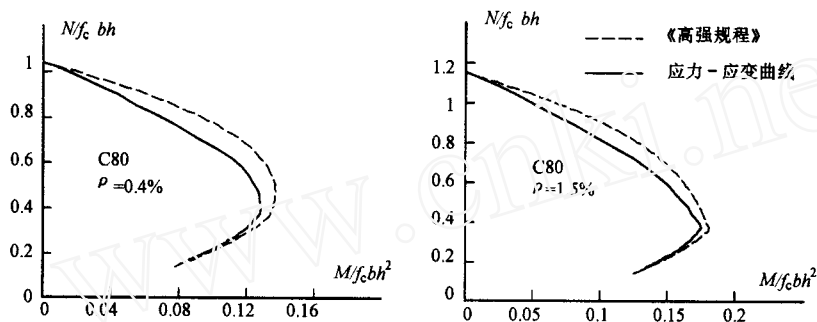
表 8 按等效矩形应力图计算结果与试验结果对比的统计

N_u^c/N_c^c	表 7 建议	《规程 CECS104: 99》
平均值	1.008	0.990
均方差	0.087	0.090
最大值	1.247	1.245
最小值	0.802	0.771

由于高强混凝土等效矩形应力图形系数 α 小于 1.0, 偏心受压与轴心受压的计算会产生不连续。图 5 为按等效矩形应力图形和应力-应变曲线计算的正截面承载力轴力-弯矩相关关系的对比。由图可见, 按表 7 建议的图形系数, 在轴心受压时存在不连续, 但大部分范围与理论结果吻合较好。而与轴心受压的不连续也是偏于安全。由于实际工程中没有理想的轴心受压构件, 美国 ACI 规范考虑偶然偏心等因素的影响, 对轴心受压承载力乘以一折减系数, 这样会使这种不连续情况在实际工程设计中有所改善。而按《规范 CECS104: 99》, 与理论结果有较大的偏于不安全的弯矩误差。因此采用两个图形系数均随强度提高而减小是较为合理的。



(a)表7建议与理论结果的对比



(b)《高强规程》与理论结果的对比

图5 按等效矩形应力图形与按应力-应变曲线计算结果的对比

5 结 论

1. 本文根据近年来我国高强混凝土结构的研究成果，总结了高强混凝土强度指标间的换算关系。对C50~C80级混凝土，有关换算关系建议如下：

立方体强度换算关系：

$$f_{cu,m}^{150} = [0.95 - \frac{0.01}{7} (f_{cu,m}^{100} - 65)] f_{cu,m}^{100}$$

柱体强度与立方体强度换算关系：

$$f_{c,m} = (0.66 + 0.002f_{cu,m}) f_{cu,m}$$

2. 建议了适用于高强混凝土正截面承载力计算的受压应力-应变曲线，

$$\text{上升段: } \sigma_c = f_c [1 - (1 - \frac{\epsilon_c}{\epsilon_0})^n] \quad \epsilon_c \leq \epsilon_0$$

$$\text{下降段: } \sigma_c = f_c \quad \epsilon_0 < \epsilon_c \leq \epsilon_{cu}$$

$$n = 2 - 0.02 (f_{cu,k} - 50) \leq 2$$

$$\epsilon_0 = 0.002 + 0.5 (f_{cu,k} - 50) \times 10^{-5} \geq 0.002$$

$$\epsilon_{cu} = 0.0033 - 2 (f_{cu,k} - 50) \times 10^{-5} \leq 0.0033$$

式中， $f_{cu,k} = 50 \sim 80\text{MPa}$ 。

3. 根据高强混凝土应力-应变曲线，并参照现行《规范 GBJ10-89》给出了等效矩形应力图形系数，如表7所示。两个图形系数随混凝土强度提高均

应有所减小，可较好地反映高强混凝土构件正截面的受力特点，计算结果与试验结果吻合更好一些。

参 考 文 献

- 1 陈肇元，朱金铨，吴佩刚．高强混凝土及其应用．北京：清华大学出版社，1992
- 2 高强混凝土结构性能及设计方法研究．见：混凝土结构设计规范第四批科研课题综合研究报告．1991
- 3 高强混凝土结构基本性能．见：混凝土结构设计规范第五批科研课题综合研究报告．1996
- 4 高强混凝土委员会．高强混凝土及其应用第一届学术讨论会论文集．1992
- 5 高强混凝土委员会．高强混凝土及其应用第二届学术讨论会论文集．1995
- 6 高强混凝土委员会．高强混凝土及其应用第三届学术讨论会论文集．1998
- 7 国家自然科学基金重点项目．高强与高性能混凝土．1997，1998
- 8 高强与高性能混凝土委员会．高强混凝土工程应用．北京：清华大学出版社，1998
- 9 中国土木工程学会高强混凝土委员会．高强混凝土结构与施工指南．北京：中国建筑工业出版社，1994
- 10 中国工程建设标准化协会标准，高强混凝土结构设计与施工规程 CECS104：99．1998
- 11 中华人民共和国国家标准，GBJ10-89 混凝土结构设计规范．北京：中国建筑工业出版社，1989
- 12 李家康，王巍．高强混凝土的几个基本力学指标．工业建筑，1997，27（8）

- 13 庄文华, 李娜, 张燕平. 高强混凝土的物理力学性能. 见: 高强混凝土及其应用第二届学术讨论会论文集, 1995
- 14 过镇海. 混凝土的强度和变形—试验基础和本构关系. 北京: 清华大学出版社, 1997
- 15 关萍, 王清湘, 赵国藩. 高强约束混凝土应力—应变本构关系的试验研究. 见: 第二届高强混凝土及其应用学术讨论会论文集, 1995
- 16 叶列平, 叶燕华. 箍筋约束高强混凝土应力—应变全曲线的试验研究. 见: 约束混凝土与普通混凝土强度理论及应用学术讨论会论文集, 1987
- 17 CEB - FIP Model Code 1990 (Concrete Structures)
- 18 Norwegian Standard, Concrete Structures Design Rules NS3474E, 1992. 11
- 19 德国标准, DIN1045 (草案), 1997
- 20 石裕翔, 庄崖屏. 高强混凝土偏心受压短柱正截面承载力的计算. 见: 第一届高强混凝土及其应用学术讨论会论文集. 1992
- 21 Canadian Standards Association, A23. 3 - 94 Design of Concrete Structures, Rexdale, Ontario, Dec. 1994
- 22 Ibrahim, Hisham and MacGregor, James G. Flexural behavior of high strength concrete columns, Structural Engineering Report No. 196, University of Alberta, Edmonton Alberta, Mar. 1994
- 23 Xie J, Elwi A E and James G MacGregor. Performance of high strength concrete tied columns—a parametric study. ACI Structural J. Mar /Apr. 1997
- 24 Thorenfeldt E, Tomazawicz A and Jensen J J. Mechanical properties of high strength concrete and application in design, Utilization of High Strength Concrete, Proceeding, First International Symposium in Stavager, Norway, 1987, pp. 149 ~ 159
- 25 ACI 441R - 96, High - Strength Concrete Columns: State of the Art, reported by joint ACI - ASCE committee 441, ACI Structure Journal, May - June 1997, pp. 323 ~ 335

THE CAPACITY OF NORMAL SECTION FOR HIGH - STRENGTH CONCRETE MEMBERS

Ye Lieping Zhuang Yaping Wu Peigang Feng Peng Shen Yue
(Tsinghua University)

Abstract

The concrete strength grade in the new modification version of Chinese concrete design code is expanded from C60 to C80. This paper is the background for the modification version of the design code. The conversion factors between concrete strengths for high-strength concrete (HSC) is suggested. Then, a simple form of the stress-strain curve is proposed to calculate the capacity of normal section for high-strength concrete. The parameters of the suggested curve are analyzed by comparing theoretical results with that of the test. The equivalent rectangular stress block coefficients are also given by the suggested curve.

Key words: high-strength concrete; normal section; capacity; stress-strain curve; equivalent rectangular stress block

叶列平: 博士, 副教授, 主要从事混凝土结构基本理论、钢筋混凝土结构、混凝土结构抗震与减震、混凝土结构加固补强技术等方面的研究工作, 现为中国工程建设标准化协会混凝土结构委员会委员, 中国土木工程学会-混凝土与预应力混凝土分会-高强与高性能混凝土委员会委员, 中国建筑学会-高层建筑抗震专业委员会委员, 中国振动工程学会-结构控制专业委员会理事, 中国振动工程学会-工程抗震理论及计算机软件专业委员会副主任委员。通讯地址: 100084 北京清华大学土木工程系

庄崖屏: 教授, 主要从事混凝土结构基本理论、高强与高性能混凝土结构等方面的研究工作。

吴佩刚: 教授, 主要从事混凝土结构基本理论、高强与高性能混凝土结构等方面的研究工作, 中国土木工程学会-混凝土与预应力混凝土分会理事, 高强与高性能混凝土委员会副主任委员。

冯 鹏: 博士研究生。

沈 悦: 博士研究生。

上海将建黄浦江上第六桥

又一道绚丽的巨虹将在黄浦江上腾空而起, 并有望创下同类桥梁的“世界第一”, 这便是上海市今年计划动工兴建的卢浦大桥(暂命名)。“巨虹”将从卢湾昂首, 跨越近 500 米的浦江连接浦东, 成为黄浦江上的第 6 座大桥, 也是上海第 4 座连接浦西浦东的大桥。

卢浦大桥主桥的桥型将采用儒雅俊秀的新造型——中承式系杆拱桥。目前世界上已建成的拱桥跨径最大的美国 Newriver Corge 桥, 主跨 518 米。而卢浦大桥初步定为 550 米, 建成后将成为同类桥梁中世界第一跨径。