

中部大学 正員 伊藤和幸

(記号) f'_c, f_c : コンクリートの指定(設計)圧縮強度, 圧縮強度, f_y, f_s : 鉄筋の指定降伏強度, 降伏強度, ρ_g : 釣合い鉄筋比, K : ρ_g の逆減係数, P_f : 圧縮強度となる確率, γ_c : コンクリートの割増し係数, E_{cu} : コンクリートの圧縮線形局みずみ, E_{sy} : f_s/E_s ($E_s = \text{Const.}$), 添字 C: コンクリート, 添字 S: 鉄筋, 添字 SC: f_s 軸に変換された f_c の添字, μ : 平均値, σ : 標準偏差, $V(\%)$: 変動係数, ϕ : 確率密度函数, σ : (μ -指定強度)/3.

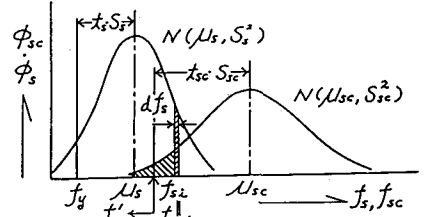
図-1 f_s, f_{sc} の分布

表-1

$V_c(\%)$	管理の程度	対象コンクリート
20	Poor	Site-mix, In-situ
15	Average	Ready-mix, In-situ
10	Excellent	Precast

表-2 欧米における鉄筋資料

Grade f_y	供試体 本数	製 作 国 名	μ_s		V_s %	σ_s —
			f_{sc}	MPa		
40	78	カナダ	51.2	353	4.1	5.34
40	—	カナダ	52.4	361	—	—
40	171	U.S.A	42.7	329	12.4	1.30
50	656	イギリス	67.1	463	9.3	2.74
60	132	カナダ	71.5	493	7.7	2.09
60	1,173	イギリス	66.9	461	4.8	2.15
60	381	イギリス	66.3	457	6.9	1.38
60	141	U.S.A	70.6	486	10.5	1.43
60	542	U.S.A	67.5	465	7.3	1.52
60	272	U.S.A	66.8	460	7.3	1.39
60	309	U.S.A	64.6	445	7.6	0.94
60	32	U.S.A	70.0	483	7.1	2.01
60	60	U.S.A	68.3	471	8.2	1.48

1. 要旨 前回に発表した^{1,2)}(日本の鉄筋資料を使用)圧縮強度となる確率 P_f および所定の信頼度と有する逆減係数 K を求める方法を用い、今回は米国を主とする資料を適用し、ACI 規準の $K=0.75$ では P_f が大きいことを指摘し、同規準作成の背景として、Hognestad 等(以下、Hog. と略称)の実験による E_{cu} に基づく釣合い鉄筋比の原々から、所定の信頼度としては $P_f=0.01$ (連続型ガリ管でモーメントの両方配を考慮するときは $P_f=0.00135$) が適切であることを説明し、真に釣合い鉄筋比以下が要求される腐蝕部群に対する逆減係数を提案したものである。

2. 資料および算式 (1) コンクリート: γ_c は ACI 規準により求める。表-1³⁾により, V_c は 10, 15, 20 (%) を, f_c は常用される 3 ~ 5 f_{sc} (21 ~ 35 MPa) を適用する。(2) 鉄筋: 表-2⁴⁾により, 特別に大きいカナダの資料を除き, σ_s は 2.5 ~ 1.5 を, V_s は 6, 8, 10, 12 (%) を, Grade は 40 ~ 60 を適用する。(3) ρ_g は次式による。 $\rho_g = 0.85 P_f \cdot (f_c/f_y) \cdot \{87/(87+f_y)\}$ (f_{sc}) — (1)

3. ACI 規定値 $K=0.75$ での P_f 計算の結果を表-3 に示す。

表より, σ_s, V_s が大きいほど, また, V_c が小さいほど P_f は大きい。各 Case の $\sigma_s=2.5, V_c=10$ では $\mu_{sc} < \mu_s$, その逆値でも 28.5 ~ 47.2 (%) であり、これでは引張り破壊を十分に期待することはできない。また, 各 σ_s, V_s, V_c に対する P_f は非常に変化しており, ある一定の信頼度 P_f で K 値を求める必要がある。Case 1 ~ 4 のうち, P_f が大きいのは Case 3 であるので, 次節ではこの Case を適用する。

4. 所定の P_f での K 値 計算の結果を表-4 に示す。表より, ACI の項は式 (1) によるもので, 米, 米 印以外は ACI の規定値 $K=0.75$ (または 0.5) より低い。Hog. の項は, $\rho_g = k_1 k_2 \cdot (f'_c/f_y) \cdot [E_{cu}/(E_{cu} + E_{sy})]$ — (2), $k_1 k_2 = (3.9 + 0.35 f'_c)/(3.2 + f'_c)$, $E_{cu} = 0.004 - f'_c/(6.5 \times 10^4)$ (f_{sc}) — (3) によるもので, ACI の項に較べて K 値の逆下は著しく軽減されている。すなわち, 表-2 を参照して, 米国の大部分の資料 ($\sigma_s \leq 2.0, V_s \leq 8$) では ACI 規定の K 値で充分なことが判る。よって, 規定の K 値の作成の背景は, $K=0.75$ に対しては $P_f=0.01$, $K=0.50$ に対しては $P_f=0.00135$, と見料される。また, 表-1 を参照して, Precast Concrete (たとえば $V_c=10$) の場合には, 両材料の品質管理の現状では, $K=0.75$ を 0.50 ($P_f=0.01$ に対して) に, $K=0.50$ を 0.45 ($P_f=0.00135$ に対して) に下げる必要がある。

5. 現場で打設されたコンクリートに対する K 値 一般に現場で打設されたコンクリートの強度は同一配合の

円柱状試体の強度より幾分か低い傾向を示す。この差は、打設養生の相違、高さの高い部材に打設するときの垂直方向への水の移動、大きさおよび形状の相違、構造物と試体での応力の作用の仕方の相違、等によるものである。Mirza等はAllen, Bloem, Petersons, 等の研究に基づき、最低限許容する養生を行った構造物のコンクリートの平均28日強度 f_x は次式で示されるとしている。

$$f_x = 0.675 f_c' + 1.1 \leq 1.15 f_c' \text{ (ksi)} \quad (4)$$

式(4)において、Case 1~4のうち、 f_c' が大きい場合 (Case 2, 4) は f_x は f_c' からの低下率が大きく、よって f_x は大きくなる。また、表-3 により、Case 4

の方がCase 2より f_x が大きいので、Case 4について、式(4)と式(2), (3) を用いて所定の f_x に対する K 値と求めた結果を表-5 に示す。この表と表-1 により、Site-mix and In-situ Concrete (ただし $V_c \approx 20$) および Ready-mix and In-situ Concrete (ただし $V_c \approx 15$) は何れも現場の両材料の品質管理の程度では、 $K=0.75$ と 0.35 ($f_x = 0.01$ に対して) に、 $K=0.50$ と 0.30 ($f_x = 0.00135$ に対して) に下げる必要がある。

6. 結論 (1) ACI 規準による $K=0.75$ では、同規準の f_c を求める式と適用した場合には圧縮破壊となる確率は極めて高い。(2) f_c は本筋筋には E_u に基づいて定められるべきである。Hog. 等の実験による E_u に基づく式(3), (2)を用いて所定の f_x に対する K 値と求めた場合、一部を除き殆んど $f_x = 0.01, 0.00135$ に対する K 値は ACI の規定値に充分である。(3) よって、その規定値 ($K=0.75, 0.50$) の背景は天々 $f_x = 0.01, 0.00135$ に対応するものと思料される。(4) Precast Concrete に対しては $K=0.50$ ($f_x = 0.01$), 0.45 ($f_x = 0.00135$) が、Site-mix および Ready-mix の In-situ Concrete に対しては何れも $K=0.35$ ($f_x = 0.01$), 0.30 ($f_x = 0.00135$) が適切である。

〔参考文献〕 1). 伊藤和幸, “斜め鉄筋は以下にあるための条件に関する統計学的考察”, 土木学会第38回年次講演概要集, V-44, Sep. '83, p.87-88. 2). 伊藤和幸, “構造物の破壊の予知-斜め鉄筋比”, 電力誌, No. 188, Jan. '84, p.103-114. 3). Mirza, S.A., Hatzinikolas, M., MacGregor, J.G., “Statistical Descriptions of Strength of Concrete”, Proc. ASCE, Vol. 101, No. 5, June, '79, p.1021-1037. 4). Mirza, S.A., MacGregor, J.G., “Variability of Mechanical Properties of Reinforcing Bars”, Proc. ASCE, Vol. 101, No. 5, May, '79, p.924-937. 5). Hognestad, E., Hanson, N.W., McHenry, D., “Concrete Stress Distribution in Ultimate Strength Design”, J. ACI, Vol. 27, No. 4, Dec. '51, p.447-479.

表-3 ACI 規定値 $K=0.75$ に対する圧縮破壊となる確率 P_f

()内は MPa (%)

Case	Grade f_y	f_c'	t_s	V_s (%)	V_c (%)			Case	Grade f_y	f_c'	t_s	V_s (%)	V_c (%)			
					20	15	10						20	15	10	
1	40	3	(276)	(21)	2.5	12	18.1	41.1	12	22.4	47.2	12	22.4	47.2	12	22.4
						10	9.5	24.0	10	11.7	28.7	10	11.7	28.7	10	11.7
						8	4.6	11.3	8	5.5	14.0	8	5.5	14.0	8	5.5
						6	2.1	4.3	6	2.3	5.3	6	2.3	5.3	6	2.3
						12	9.5	23.2	12	11.5	27.1	12	11.5	27.1	12	11.5
						10	5.2	13.1	10	6.3	15.9	10	6.3	15.9	10	6.3
					2.0	12	2.6	4.2	12	3.2	7.6	12	3.2	7.6	12	3.2
						8	1.4	2.6	8	1.6	3.1	8	1.6	3.1	8	1.6
						6	0.9	1.5	6	1.0	1.7	6	1.0	1.7	6	1.0
						12	4.7	11.6	12	5.9	14.0	12	5.9	14.0	12	5.9
						10	2.8	6.5	10	3.3	7.9	10	3.3	7.9	10	3.3
						8	1.6	3.2	8	2.2	3.9	8	2.2	3.9	8	2.2
1.5	12	1.6	4.2	12	1.7	4.4	12	1.7	4.4	12	1.7					
	10	0.8	2.2	10	0.9	2.4	10	0.9	2.4	10	0.9					
	8	0.4	1.1	8	0.5	1.2	8	0.5	1.2	8	0.5					
	6	0.2	0.6	6	0.3	0.7	6	0.3	0.7	6	0.3					
	12	1.6	4.2	12	1.7	4.4	12	1.7	4.4	12	1.7					
	10	0.8	2.2	10	0.9	2.4	10	0.9	2.4	10	0.9					
2	40	5	(276)	(35)	2.5	12	11.6	28.5	12	15.1	34.4	12	15.1	34.4	12	15.1
						10	5.6	14.2	10	7.2	18.1	10	7.2	18.1	10	7.2
						8	2.5	5.6	8	3.1	7.2	8	3.1	7.2	8	3.1
						6	1.1	1.8	6	1.2	2.3	6	1.2	2.3	6	1.2
						12	5.7	14.2	12	7.1	17.6	12	7.1	17.6	12	7.1
						10	2.9	6.9	10	3.6	8.8	10	3.6	8.8	10	3.6
					2.0	12	1.4	2.6	12	1.7	3.5	12	1.7	3.5	12	1.7
						8	0.7	1.0	8	0.8	1.2	8	0.8	1.2	8	0.8
						6	0.4	0.7	6	0.5	0.9	6	0.5	0.9	6	0.5
						12	2.7	6.2	12	3.3	8.1	12	3.3	8.1	12	3.3
						10	1.4	3.1	10	1.8	3.9	10	1.8	3.9	10	1.8
						8	0.8	1.3	8	0.9	1.7	8	0.9	1.7	8	0.9
1.5	12	1.4	3.1	12	1.8	3.9	12	1.8	3.9	12	1.8					
	10	0.8	1.3	10	0.9	1.7	10	0.9	1.7	10	0.9					
	8	0.4	0.7	8	0.5	0.9	8	0.5	0.9	8	0.5					
	6	0.2	0.6	6	0.3	0.7	6	0.3	0.7	6	0.3					
	12	2.7	6.2	12	3.3	8.1	12	3.3	8.1	12	3.3					
	10	1.4	3.1	10	1.8	3.9	10	1.8	3.9	10	1.8					

表-4 指定 f_x 値に対する K 値 (Case 3)

t_s	V_s (%)	V_c (%)	P_f ACI		P_f Hog.	
			0.01	0.00135	0.01	0.00135
2.5	12	20	0.45	0.35	0.55	0.45
		15	0.40	0.35	0.50	0.45
		10	0.40	0.35	0.50	0.45
		20	0.50	0.40	0.65	*
		15	0.50	0.40	0.60	*
		10	0.50	0.45	0.60	*
	8	20	0.60	0.45	0.70	*
		15	0.55	0.45	0.70	*
		10	0.55	*	0.70	*
		20	0.65	*	*	*
		15	0.65	*	*	*
		10	0.65	*	*	*
2.0	12	20	0.50	0.40	0.65	*
		15	0.45	0.40	0.60	*
		10	0.45	0.40	0.60	*
		20	0.55	0.45	0.70	*
		15	0.55	0.45	0.65	*
		10	0.55	0.45	0.65	*
	8	20	0.65	*	*	*
		15	0.60	*	*	*
		10	0.60	*	*	*
		20	0.70	*	*	*
		15	0.65	*	*	*
		10	0.65	*	*	*

*: $K \geq 0.75$, *: $K \geq 0.50$

表-5 現場で打設したコンクリートに対する K 値 (Case 4)

t_s	V_s (%)	V_c (%)	P_f Hog.	
			0.01	0.00135
2.5	12	20	0.35	0.30
		15	0.35	0.30
		10	0.40	0.35
		20	0.40	0.35
		15	0.45	0.40
		10	0.50	0.45
	8	20	0.45	0.40
		15	0.50	0.45
		10	0.50	0.45
		20	0.55	*
		15	0.55	*
		10	0.55	*
2.0	12	20	0.40	0.30
		15	0.40	0.35
		10	0.45	0.35
		20	0.45	0.35
		15	0.45	0.35
		10	0.50	0.40
	8	20	0.50	0.45
		15	0.50	0.45
		10	0.55	0.45
		20	0.55	0.45
		15	0.60	*
		10	0.60	*
1.5	12	20	0.40	0.35
		15	0.45	0.40
		10	0.45	0.45
		20	0.45	0.45
		15	0.50	0.45
		10	0.50	0.45
	8	20	0.50	0.45
		15	0.55	*
		10	0.55	*
		20	0.55	*
		15	0.60	*
		10	0.60	*