

鉄建建設K.K. 正員 〇市川 義政
信州大学工学部 正員 長 尚

1. まえがき

先に鉄筋コンクリート構造物設計法のコード・キャリブレーションについて発表したが¹⁾、その際式の展開を容易にするために線形化近似法を用いた。この近似的な扱いがコード・キャリブレーションの結果にどのような影響を及ぼしているかをみるために、比較的精度の高い Hasofer らの定義した安全性指標²⁾を用いてコード・キャリブレーションを行なったので、以下その結果と若干の考察について記す。

2. Hasofer らの定義した安全性指標について

Hasofer らは“破壊限界曲面 $Z = g(X) = 0$ ……(1) において、確率変数 X_i を $Z_i = (X_i - \bar{X}_i) / \sigma_i$ ……(2) もしくは $Z_i = (\ln X_i - \ln \bar{X}_i) / V_i$ ……(3) を用いて正規化変換して標準化空間で表現された破壊限界曲面 $\tilde{Z} = \tilde{g}(X) = 0$ ……(4) への原点 ($X=0$) からの距離 (ノルム) が安全性指標 β である”と定義した。ここには、 σ_i , V_i : 標準偏差, 変動係数である。先に指摘したように、この定義による安全性指標 β の精度は線形化近似法による β に比べてはるかに高く、設計問題では正確値に近いものである。この定義になる β を求める手順は次の通りである。(a) 式(2) もしくは(3) の関係を式(1)に代入して式(4)を作る。(b) $\tilde{Z} = 0$ の曲面と、これに原点から下ろした垂線の交点の近似値 X^0 を仮定する。(c) 次式より X^a を計算する。 $X^a = \nabla \tilde{Z}(X^0) \cdot [\nabla \tilde{Z}(X^0)^T \nabla \tilde{Z}(X^0) / \{\nabla \tilde{Z}(X^0)^T \nabla \tilde{Z}(X^0)\}]$ ……(5) (d) ある1つの変数 X_j を除き、 $X^1 = X^a$ とし、 X_j^1 は $\tilde{Z}(X^1) = 0$ の関係を用いて定める。(e) $|X^1 - X^0| > \epsilon$ (精度) であれば $X^0 = X^1$ として(c)へ戻る。(f) $\beta = \sqrt{\sum_i (Z_i^1)^2}$ ……(6)

3. コード・キャリブレーションの方法

まず現行設計の安全性指標を求めるための破壊限界曲面の式は次のようになる。 $Z = \sigma_s \{1 - \sigma_s \alpha_A \rho_s / (1.7 \sigma_c \alpha_b \alpha_d)\} \alpha_A \alpha_d E_R \rho_s - (m_D + m_L) E_s V_s = 0$ ……(7) ここに、 σ_s : 鉄筋の降伏点強度, $\alpha_A = A_s / \bar{A}_s$, A_s : 鉄筋の断面積, ρ_s : 鉄筋比, σ_c : コンクリートの円柱体試体の強度, $\alpha_b = b / \bar{b}$, b : 断面の幅, $\alpha_d = d / \bar{d}$, d : 有効高さ, E_R : 強度算定修正係数, m_D : 死荷重率, m_L : 活荷重率, E_s : 曲げモーメント算定修正係数, $V_s = 0.5 \sigma_{ca} k_0 (1 - k_0 / 3)$, σ_{ca} : コンクリートの許容応力度, k_0 : 鉄筋断面の中立軸比である。式(7)中の確率変数 X は、 $\sigma_s, \alpha_A, \sigma_c, \alpha_b, \alpha_d, E_R, m_D, m_L, E_s$ の計9個で、これらはいずれも対数正規分布するものとして、2.で述べた方法により β を求める。次にこの β の重みつき平均を目標安全性指標 β としてコード・キャリブレーションを行なう。限界状態設計法の常時の終局限界状態の設計フォーマットを次のようなものとする。 $f(\sigma_{cr} / \eta, \sigma_{sr}) \geq Y_D' M_D^k + Y_L' M_L^k$ ……(8) ここに、 σ_{cr} : コンクリートの強度の特性値, η : 鉄筋の強度の部分安全係数に対するコンクリートの強度の部分安全係数の比, σ_{sr} : 鉄筋の強度の特性値, Y_D' : 死荷重係数, Y_L' : 活荷重係数, M_D^k, M_L^k : 死荷重, 活荷重の特性値を用いて計算された曲げモーメントである。この式(8)を用いて限界状態設計法により設計された断面についての破壊限界曲面の式は次のようになる。 $Z = \sigma_s \{1 - \sigma_s \alpha_A \bar{\rho} / (1.7 \sigma_c \alpha_b \alpha_d)\} \alpha_A \alpha_d E_R \bar{\rho} - (m_D + m_L) E_s V_s = 0$ ……(9) ここに、 $\bar{\rho}$: 平均鉄筋比, $V_s = \sigma_{sr} \bar{\rho} \{1 - \sigma_{sr} \bar{\rho} / (1.7 \sigma_{cr})\} / (Y_D' m_D^k + Y_L' m_L^k)$, m_D^k, m_L^k : 死, 活荷重率の特性値である。この式(9)に2.で述べた方法を適用すれば β を計算することはできる。 Y_D', Y_L', η は、 $\sum_i (\beta_i - \beta) \omega_i \rightarrow \min$ ……(10) が満たされるように決める。ここに ω_i : 重みである。

4. 計算結果および考察

表-1に現行の許容応力度設計法により設計される断面の安全性指標 β の値を示す。この表において、①: 線

形近似法, ②: Hasofer らの定義を用いた方法, ③: モンテカルロ法 (有効数字3ケタの精度が出るように, 先に提案した方法⁴⁾を用いられている)

あることを示す。この表から, Hasofer らの定義による β ②はほとんど正解③に一致していることがわかる。

次にコード・キャリブレーションの結果を示すと次のようになる。

① $A: f(\sigma_{cr}/1.05, \sigma_{sr}) \geq 1.5M_D + 1.55M_L^k \dots (11)$
 $B: f(\sigma_{cr}/1.15, \sigma_{sr}) \geq 1.85M_D + 1.75M_L^k \dots (12)$

② $A: f(\sigma_{cr}/1.1, \sigma_{sr}) \geq 1.45M_D + 1.6M_L^k \dots (13)$
 $B: f(\sigma_{cr}/1.15, \sigma_{sr}) \geq 1.8M_D + 1.85M_L^k \dots (14)$

これらの結果を比較すると, ①, ②では多少の違いはあるが, コード・キャリブレーションの性格から考えると, ほとんど差がないといえる。

表-2に, 式(13), (14)を用いて限界状態設計を行なった断面の安全性指標 β (Hasofer らの定義による) を示す。この表-2と表-1の②を比較すると, 現行の許容応力度設計法で設計された断面の安全性指標は A の場合, 2.79~4.09 の範囲で, B の場合, 3.89~4.9 の範囲で, それぞればらついているが, コード・キャリブレーションの結果を用いて限界状態設計を行なうと, A の場合, 3.14~3.59 の範囲に, B の場合 4.47~4.7 の範囲に, それぞればらつきの幅が小さくなり, その分だけ安全度のバランスがとれることになる。

参考文献 1) 長尚地: 鉄筋コンクリート構造物設計法のコード・キャリブレーション, 土木学会論文報告集, 第287号, 1979. 2) A. M. Hasofer et al: Exact and Invariant Second Moment Code Format, Proc. of ASCE, Vol. 100, EM1, 1974. 3) 長尚地: 安全性指標 β に関する若干の考察, 土木学会中部支部昭和54年度研究発表会講演要集, 1980. 4) 長尚地: 破壊確率の一計算法, 土木学会中部支部昭和54年度研究発表会講演要集, 1980.

表-1

σ_a^n (σ_{da}) kg/cm ²	公称 死荷重 比 号	A (道路)									B (鉄道)								
		$\sigma_c^n (\sigma_{ca})$ kg/cm ²									$\sigma_c^n (\sigma_{ca})$ kg/cm ²								
		180(60)			240(80)			300(100)			180(60)			240(80)			300(100)		
		①	②	③	①	②	③	①	②	③	①	②	③	①	②	③	①	②	③
2400 (1400)	0	4.03	4.02	4.02	4.10	4.09	4.08				4.03	4.02	3.99	4.10	4.09	4.08			
	0.5	4.27	3.77	3.72	4.34	3.82	3.77				4.86	4.56	4.56	4.39	4.62	4.55			
	1	3.93	3.37	3.31	3.99	3.42	3.36				5.11	4.71	4.65	5.19	4.78	4.73			
	2	3.47	3.06	3.04	3.52	3.10	3.09				5.17	4.77	4.77	5.24	4.83	4.77			
	3	3.24	2.93	2.90	3.29	2.97	2.96				5.12	4.77	4.77	5.18	4.83	4.80			
3000 (1800)	4	3.10	2.86	2.81	3.15	2.90	2.88				5.06	4.76	4.78	5.13	4.82	4.79			
	0				3.89	3.89	3.85	3.95	3.85	3.94				3.89	3.89	3.89	3.95	3.95	3.93
	0.5				4.44	3.67	3.62	4.20	3.71	3.66				4.72	4.42	4.43	4.78	4.48	4.49
	1				3.82	3.28	3.22	3.87	3.32	3.28				4.97	4.58	4.61	5.03	4.64	4.64
	2				3.83	2.98	2.96	3.42	3.02	3.02				5.04	4.65	4.65	5.09	4.70	4.69
3500 (2000)	3				3.15	2.86	2.83	3.19	2.89	2.85				4.99	4.65	4.64	5.04	4.70	4.90
	4				3.02	2.79	2.78	3.06	2.82	2.80				4.94	4.64	4.63	4.99	4.69	4.74
	0													4.11	4.11	4.10	4.17	4.16	4.15
	0.5													4.85	4.64	4.60	5.01	4.69	4.65
	1													5.21	4.80	4.73	5.26	4.85	4.85
	2													5.26	4.85	4.80	5.31	4.90	4.86
	3													5.20	4.84	4.82	5.25	4.89	4.85
	4													5.14	4.83	4.81	5.19	4.88	4.89
β		①	3.62	②	3.29	③	3.26	①	4.87	②	4.58	③	4.57						

表-2

σ_a^n	ξ	A			B		
		σ_c^n			σ_c^n		
		180	240	300	180	240	300
2400 (1400)	0	3.16	3.16		4.47	4.47	
	0.5	3.59	3.59		4.70	4.70	
	1	3.40	3.40		4.69	4.69	
	2	3.24	3.24		4.60	4.60	
	3	3.17	3.17		4.53	4.53	
3000 (1800)	4	3.14	3.14		4.48	4.48	
	0	3.16	3.16		4.47	4.47	
	0.5	3.59	3.59		4.70	4.70	
	1	3.40	3.40		4.69	4.69	
	2	3.24	3.24		4.60	4.60	
3500 (2000)	3	3.17	3.18		4.53	4.53	
	4	3.14	3.14		4.48	4.48	
	0				4.47	4.47	
	0.5				4.70	4.70	
	1				4.69	4.69	
	2				4.60	4.60	
	3				4.53	4.53	
	4				4.48	4.48	
β		3.29			4.58		