

[26] RC建築物における鉄筋のかぶり厚さの信頼性設計手法

正会員 ○和泉 意登志(竹中工務店技術研究所)

正会員 嵩 英雄(竹中工務店技術研究所)

正会員 押田 文雄(竹中工務店技術研究所)

1. まえがき

近年、省資源・省エネルギーが社会的要請となり、建築物においても耐用年数の向上が重要な課題となっている。新設建築物の耐用年数を向上させるためには、機能的、社会的、経済的観点からの耐用性および物理化学的な耐久性の向上が必要であり、物理化学的な耐久性の向上を図るためには、具体的な設計・施工技術を確立することが必要である。建築物の設計者は、常に耐久性を考慮した設計を行ってきたはずであるが、定量的な算定手法は標準化されていないのが現状であろう。

コンクリート工学分野においては、構造物または部材の経時的な品質特性を耐久性とか寿命などという言葉で表現してきた。これらの言葉については、定性的な定義はあっても、定量的な定義を持っていなかった。このことが、耐久性設計とか寿命予測などの定量的な定算法を確立する上での障害となっていたのではないと思われる。他の工学分野においては、第2次世界大戦以後、信頼性工学が電子工学やシステム工学を中心として急速に発達し、さまざまな工学分野に普及しつつある。¹⁾信頼性工学では、信頼性を「アイテムが与えられた条件で規定の期間中、要求された機能を果たすことができる性質」(JIS Z 8115)と定義し、耐久性を含むより広い概念として用いている。信頼性を定量化し、確率で表わしたものが信頼度である。この信頼度を数量的に扱うことによつて、設計、予測などを定量的に算定することが可能となっている。

コンクリート工学においても、耐久性の設計とか寿命の予測を行うためには、信頼性工学における定量的な考え方を導入する必要があると考える。まず最初に必要なことは、①対象とは何か、②その適正な機能とは何か、したがって故障とは何か、③規定の使用環境、④規定の時間、を明記することである。¹⁾

筆者らは、第6回の本講演会において、信頼性工学の考え方を導入した「鉄筋のかぶり厚さの信頼性設計の基本的考え方」を提案した。²⁾本報告は、この手法を応用し、RC建築物における鉄筋のかぶり厚さの設計手法および仕上げ材やコンクリートの品質選定手法を具体例で示したものである。

2. 鉄筋のかぶり厚さの信頼性設計手法

2.1 手法の基本概念

RC建築物におけるコンクリートの中性化は、一般環境下においても着実に進行している。このため、コンクリート中に存在する鉄筋はいつかは腐食する宿命にある。本手法では、コンクリートの中性化によつて鉄筋が腐食し、鉄筋コンクリート構造物として所要の機能を果たすことができなくなる場合に限定している。本手法の詳細は、第6回の本講演会の報文を参照していただくこととして、要点のみを再度説明する。³⁾

本手法のポイントとなっているのは、RC建築物におけるコンクリートの中性化深さと鉄筋のかぶり厚さのばらつきを統計的に考慮し、信頼性工学の考え方に基づいてRC建築物の鉄筋腐食による故障を鉄筋が腐食する確率で定量的に定義したことである。従つて上述の明確にすべき4項目を以下のように考える。

- ①対象とは何か → RC建築物におけるRC部材
- ②故障とは何か → RC部材において鉄筋が腐食し、要求される機能を満たさなくなった状態、この状態を鉄筋の腐食確率で定量的に定義する
- ③規定の使用環境 → 一般大気中(屋内外)
- ④規定の時間 → RC建築物の耐用年数

2.2 鉄筋の腐食確率

鉄筋の腐食確率とは、部材のコンクリート中にある鉄筋の中で、問題となる腐食状態にある鉄筋の確率のことであり、鉄筋の種類別に表わす。たとえば、屋外に面する柱の場合、屋外に面するフープ面の全長をLとし、この中で問題となる腐食を生じている部分の全長をℓとすると、鉄筋の腐食確率Pとは、 $P = \ell/L$ のことである。この値ℓ/Lは、ランダムにN本のフープ筋を切り出し、問題となる腐食を生じているフープ筋をn本とした場合、Nが十分に大きい数であればn/Nに一致することになる。鉄筋の腐食確率Pは次式を用いて算定できる。

$$P_1 = \int_{-\infty}^0 f(D-C_t) d(D-C_t) \quad (\text{屋外面で風雨にさらされる場合}) \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$P_2 = \int_{-\infty}^{-2} f(D-C_t) d(D-C_t) \quad (\text{屋内面の場合}) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、

$$f(D-C_t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi \cdot (\bar{C}_t^2 \cdot v^2 + \sigma^2)}} \cdot \exp \frac{-\{(D-C_t) - (\bar{D} - \bar{C}_t)\}^2}{2(\bar{C}_t^2 \cdot v^2 + \sigma^2)} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\bar{C}_t = \alpha \cdot \beta \cdot r \sqrt{t} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$r = \frac{R = (x - 0.25)}{\sqrt{0.3(1.15 + 3x)}} \quad (x \geq 0.6), \quad r = 0.37R(4.6x - 1.76) \quad (x \leq 0.6) \quad \dots\dots\dots (5)$$

D：鉄筋のかぶり厚さ， C_t：中性化深さ， v：中性化深さの変動係数， σ：かぶり厚さの標準偏差
 α：環境条件による定数， β：仕上げ材による係数， x：水セメント比， R：骨材やセメントの種類によって定まる定数

2.3 鉄筋の腐食故障

鉄筋の腐食による建築物の故障のことを、鉄筋の腐食故障と呼ぶことにする。鉄筋の腐食確率Pを具体的な劣化症状の発生状況で説明すると表-1に示すようになる。

建築物における鉄筋の腐食故障の時点を、鉄筋の腐食確率で定量化する場合、以下の項目を考慮して設定する必要がある。

- 1) 建築物の重要性（社会，文化的な重要性）
- 2) 日常時の安全性（コンクリートの剥落が生じるような故障が発生した場合の人体や器物に対する損傷を与える可能性）
- 3) 鉄筋の構造的な重要性（どの部材にどのような機能を持って使用されているか，鉄筋の種類）

この値の設定には、構造設計者があたるべきである。構造設計者は、建築物の所有者（または管理者）の意向を十分理解した上で、自己の設計思想に基づいてこの値を設定する必要がある。表-2は、建築物を対象として、筆者が提案する設定値である。

3. 鉄筋の設計かぶり厚さの算出

鉄筋の設計かぶり厚さDdを求めるには、式(1)~(5)においてP₁またはP₂に鉄筋の腐食故障と考える腐食確率の数値を代入し、tを目標耐用年数Tとして、x，α，β，v，σをパラメータにすることによってD̄を算出し、Dd=D̄とすればよい。鉄筋の腐食確率を表-2に示した3~50%，目標耐用年数を30,65,100年と設定し、x=45~65%，α=1.0,1.7，β=0.2~1.0，v=0.4，σ=1.0cmの場合の設計かぶり厚さを表-3に示す。

表-1 鉄筋の腐食確率と劣化症状の発生状況

鉄筋の腐食確率 P (%)	劣化症状の発生状況
P < 0.5	健全で、劣化症状が見られない
0.5 ≤ P < 3	少数の錆汁や、微小なひびわれ
3 ≤ P < 15	各所に錆汁やひびわれ、少数の剥落
15 ≤ P < 50	各所に剥落や鉄筋露出
50 ≤ P	半分以上の面に剥落や鉄筋露出

表-2 鉄筋の腐食故障と考える腐食確率の最大値

建築物の重要性 鉄筋の種類 損傷を与える可能性	鉄筋の種類 柱，はり の主筋	その他の鉄筋	
		有	無
A (特大)	3%	7%	15%
B (大)	5%	15%	30%
C (普通)	10%	30%	50%

表-3 設計かぶり厚さ数値表 (v=0.4, σ=10mmの場合) (単位mm)

P (%)	T (年)		30					65					100				
	α	β	45	50	55	60	65	45	50	55	60	65	45	50	55	60	65
3	1.0	0.2	20	21	22	23	24	21	22	24	25	26	21	23	25	27	28
		0.4	21	24	26	28	29	23	26	29	33	35	24	28	32	37	39
		0.6	23	26	30	33	35	25	30	35	41	44	26	33	40	48	51
		0.8	24	29	34	39	41	27	34	42	50	54	29	38	48	59	65
		1.0	26	32	38	45	48	29	39	49	59	65	32	44	57	71	78
	1.7	0.2	1	3	5	7	7	2	5	8	11	12	3	6	10	14	16
		0.4	3	7	11	15	18	6	12	18	25	28	8	15	23	32	37
		0.6	6	12	18	25	29	10	19	29	40	46	13	25	38	52	59
		0.8	8	17	26	36	41	14	27	41	57	65	18	35	54	73	83
		1.0	11	22	34	46	53	18	35	54	74	84	23	46	70	93	107
5	1.0	0.2	18	19	20	21	21	18	20	21	23	24	19	21	23	25	26
		0.4	19	21	23	26	27	20	23	27	30	32	21	25	30	34	36
		0.6	20	24	27	31	32	22	27	33	38	41	24	30	37	44	48
		0.8	22	26	31	36	39	25	31	39	47	51	27	36	45	55	61
		1.0	23	29	35	42	45	27	36	45	56	61	30	41	53	67	73
	1.7	0.2	0	0	2	4	5	0	2	5	8	9	1	4	7	11	13
		0.4	1	5	9	13	15	3	9	15	22	25	5	12	20	29	33
		0.6	3	9	15	22	26	7	16	26	37	42	10	22	34	48	55
		0.8	6	14	23	32	37	11	24	38	52	60	15	32	49	68	77
		1.0	9	19	31	43	49	15	32	50	68	78	20	42	64	88	100
7	1.0	0.2	16	17	18	19	20	17	18	20	21	22	17	19	21	23	24
		0.4	17	19	22	24	25	19	22	25	28	30	20	24	28	32	34
		0.6	19	22	25	29	30	21	26	31	36	39	22	28	35	42	46
		0.8	20	24	29	34	36	23	30	37	45	48	25	34	43	53	58
		1.0	22	27	33	39	43	25	34	43	53	58	28	39	51	64	70
	1.7	0.2	0	0	0	2	3	0	1	3	6	8	0	2	6	9	11
		0.4	0	3	7	11	13	2	7	13	20	23	3	10	18	26	31
		0.6	2	7	13	20	23	5	14	24	34	39	8	19	32	45	51
		0.8	4	12	21	30	34	9	22	35	49	56	13	29	46	64	73
		1.0	7	17	28	40	46	13	29	46	64	74	18	39	61	83	95
10	1.0	0.2	14	15	16	17	18	15	16	18	19	20	15	17	19	21	22
		0.4	15	17	20	22	23	17	20	23	26	28	18	22	26	30	32
		0.6	17	20	23	27	28	19	23	28	34	37	20	26	33	40	43
		0.8	18	22	27	32	34	21	27	34	42	46	23	31	40	50	55
		1.0	20	25	31	37	40	23	31	40	50	55	26	36	48	60	66
	1.7	0.2	0	0	0	0	1	0	0	1	4	6	0	0	3	7	9
		0.4	0	1	5	9	11	0	5	11	17	20	1	8	16	22	28
		0.6	0	5	11	18	21	3	12	21	31	36	6	17	29	41	48
		0.8	2	10	18	27	31	7	19	32	45	52	11	26	42	60	68
		1.0	5	15	25	37	42	11	26	43	60	69	16	36	54	78	89
15	1.0	0.2	12	13	14	15	15	12	14	15	17	17	13	15	16	18	19
		0.4	13	15	17	19	20	14	17	20	24	25	15	19	23	27	29
		0.6	14	17	20	24	25	16	21	26	31	33	18	24	30	36	40
		0.8	16	20	24	29	31	18	25	31	38	42	20	28	37	46	50
		1.0	17	22	28	34	37	20	28	37	46	51	23	33	44	56	62
	1.7	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3	0	0	1	4	6
		0.4	0	0	2	6	8	0	2	8	14	17	0	5	13	20	24
		0.6	0	3	8	14	17	1	9	18	27	32	3	14	25	37	43
		0.8	0	7	15	23	27	4	16	28	41	47	8	23	38	54	62
		1.0	2	12	22	32	38	8	23	38	55	63	13	32	51	72	82
30	1.0	0.2	7	8	8	9	10	7	9	10	11	12	8	9	11	13	14
		0.4	8	10	12	14	15	9	12	15	18	19	10	14	17	21	23
		0.6	9	12	15	18	20	11	15	20	25	27	12	18	23	29	32
		0.8	10	14	18	23	25	13	19	25	31	34	15	22	30	38	42
		1.0	12	17	22	27	30	15	22	30	38	42	17	27	36	47	52
	1.7	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		0.4	0	0	0	0	2	0	0	2	7	10	0	0	6	13	16
		0.6	0	0	2	8	10	0	3	11	19	23	0	7	17	28	33
		0.8	0	1	8	16	19	0	9	20	31	36	2	15	28	42	49
		1.0	0	5	14	22	28	2	15	29	43	50	6	23	40	58	66
50	1.0	0.2	1	2	3	4	5	2	3	5	6	7	2	4	6	7	8
		0.4	3	4	6	8	9	4	6	9	12	13	5	8	11	15	17
		0.6	4	7	9	12	14	6	10	14	18	20	7	12	17	22	25
		0.8	5	9	13	16	18	7	13	18	24	27	9	16	23	30	33
		1.0	6	11	16	20	23	9	16	23	30	33	12	20	29	37	42
	1.7	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		0.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	5	8
		0.6	0	0	0	1	3	0	0	3	11	13	0	0	9	18	22
		0.8	0	0	1	8	11	0	2	11	21	26	0	7	19	31	36
		1.0	0	0	7	15	19	0	7	19	31	37	0	14	28	43	51

4. 設計かぶり厚さ数値表の利用方法

表-3に示した設計かぶり厚さの数値表は、種々の条件における設計かぶり厚さを求めるのに利用できるのはもちろんであるが、その他にも様々な用途に利用できる。P, T, x , α , β , Ddの6変数(ここでは σ と v は一定とした)のうち、任意の4変数を固定し、残りの2変数を縦軸と横軸にとり、その関係を曲線で表わせば、横軸の変数を定めることによって、縦軸の変数の値を容易に求めることができる。

図-1および図-2は、TまたはPのいずれかと β を固定し、水セメント比 x を縦軸に、設計かぶり厚さDdを横軸にとり、目標耐用年数Tと α または鉄筋の腐食確率Pと α をパラメーターとしたものである。これらの図から、設計かぶり厚さを定め、目標耐用年数または鉄筋の腐食確率を設定することによって、コンクリートに要求される水セメント比を求めることができる。例えば、屋外でコンクリート打放し仕上げの柱のフープ筋の設計かぶり厚さを50mm、目標耐用年数を65年とし、腐食故障をP=50%と設定した場合、図-1を用いて、水セメント比64%が容易に得られる。

図-3および図-4は、TまたはPのいずれかと x を固定し、仕上げ材による係数 β を縦軸に、設計かぶり厚さDdを横軸にとり、目標耐用年数Tと α または鉄筋の腐食確率Pと α をパラメーターとしたものである。これらの図から、設計かぶり厚さを定め、目標耐用年数または鉄筋の腐食確率を設定することによって、コンクリート面に必要な仕上げ材のグレードを設定することができる。例えば、屋外の柱のフープ筋の設計かぶり厚さを40mm、目標耐用年数を100年とし、腐食故障をP=15%と設定した場合、図-3を用いて、仕上げ材による係数0.68が容易に得られる。

5. まとめ

鉄筋の腐食による建築物の故障を、鉄筋の腐食確率で数値的に定義した。この腐食確率を設定することによって、コンクリートの中性化に起因して鉄筋が腐食する場合における、鉄筋のかぶり厚さを種々の条件において求め、実用に供しえる数値表にまとめた。

ここに提案した信頼性設計手法およびその具体的な形をとった設計かぶり厚さの数値表が、実際のRC建築物の設計に応用され、期待される耐久性を有する建築物が建設されることを希望したい。

[参考文献] 1) 塩見: 信頼性工学入門, 丸善株式会社, 昭和56年

2) 和泉, 嵩, 友沢, 福士: 鉄筋のかぶり厚さの信頼性設計による耐久性向上技術の提案, 第6回コンクリート工学会年次講演会, 1984

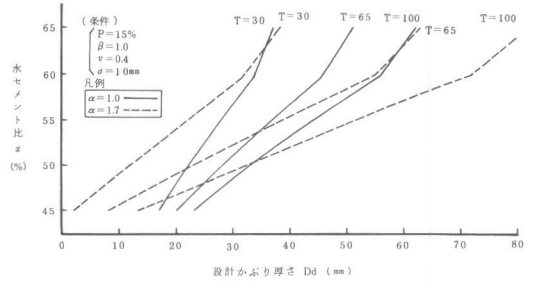


図-1 水セメント比と設計かぶり厚さの関係

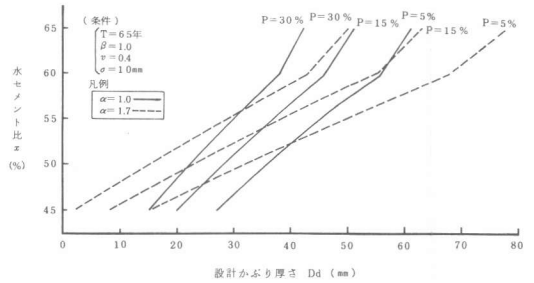


図-2 水セメント比と設計かぶり厚さの関係

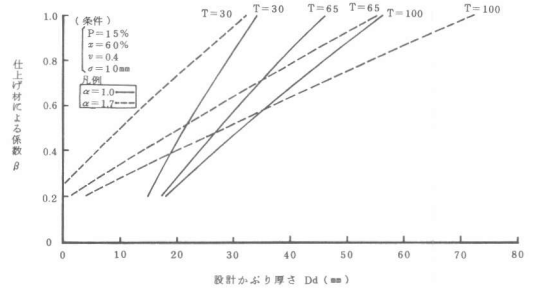


図-3 仕上げ材による係数と設計かぶり厚さの関係

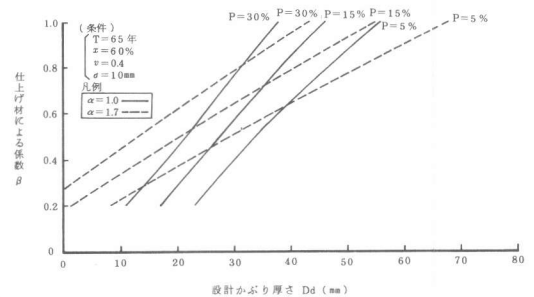


図-4 仕上げ材による係数と設計かぶり厚さの関係