

19 年経過した暴露試験体の鉄筋腐食状況調査

DB-12212 高橋 沙季

1. はじめに

鉄筋コンクリートの耐久性は RC 造建築物において最も重要な性能の一つである。特に鉄筋腐食は、美観だけでなく構造耐力に重大な影響を及ぼすとされているが、どの要因がどの程度鉄筋腐食に関係してくるかは、掛川らの実験があるのみで把握されていない。本実験では、水セメント比・セメント種類・塩化物含有量・鉄筋のかぶり厚さが、それぞれの程度鉄筋腐食に関係してくるかを把握するために行う。

2. 実験方法

2.1 実験概要

本実験では 1996 年にインドネシアのバンドンで作製され、インドネシア・日本の両国に暴露された試験体のうち、日本で 19 年間暴露された試験体を調査する。実験の要因と水準を表 1 に示す。なお、日本で暴露されていた試験体とインドネシアで暴露されている試験体は全て実験の要因が一致している。

2.2 使用材料およびコンクリートの調査

試験体は、実際にインドネシアの建築に使用されている材料を用いて作製されている。使用材料の種類と物性を表 2 に、計画調査表 (1m³) および調査結果を表 3 に示す。

2.3 暴露試験体

暴露試験体は寸法 15×15×25cm の角柱試験体で、4 本の鉄筋(かぶり厚さ 5, 10, 20, 30mm)が入っている。試験体の形状・寸法を図 1 に示す。暴露試験は 1996 年 8 月より茨城県つくば市にある建築研究所の屋外暴露試験場にて行われた。

2.4 実験項目

実験は暴露試験体・試験体コア・鉄筋それぞれについて行った。暴露試験体・試験体コアは、主に中性化深さ測定試験・各種強度試験を行った。鉄筋は、発錆状況スケッチ・腐食面積率算出・錆落とし(クエン酸水素二アンモニウム水溶液に

表 1 実験の要因と水準

要因	水準
セメントの種類	普通ポルトランド、フライアッシュ(20%)
水セメント比	0.5、0.65
塩化ナトリウム含有量 (NaCl)(kg/m ³)	0、0.3、1.5、3.0
[塩化物含有量(Cl ⁻)(kg/m ³)]	[0、0.18、0.91、1.82]
鉄筋かぶり厚さ(cm)	0.5、1.0、2.0、3.0

表 2 使用材料の種類と物性

材料	種類	物性
セメント	普通ポルトランドセメント	密度 3.15(g/cm ³)
	フライアッシュセメント	密度 2.32(g/cm ³)
粗骨材	砕石	表乾密度 2.56(g/cm ³)
細骨材	川砂	表乾密度 2.67(g/cm ³)
混和剤	高性能減水剤	
練混ぜ水	水道水	
鉄筋	丸鋼(みがき棒鋼)	径12mm 長さ230mm

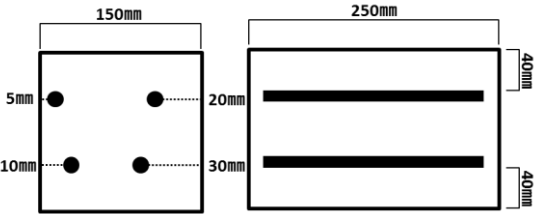


図 1 試験体の形状・寸法

表 3 計画調査表 (1m³) および調査結果

試験体 番号	水セメ ント比 (%)	細骨 材比 (%)	単位水 量 (kg/m ³)	目標空 気量(%)	目標スラ ンプ(cm)	単位質量(kg/m ³)					スラン プ 値(cm)	空 気 量 (%)	単位容積 質 量 (kg/m ³)	温度(℃)	
						セメント	フライ アッシュ	細骨材	粗骨材	塩化ナトリ ウム (g)					混和剤 (l)
N50-0	50	40.0	180	1.5	15.0	360	0	707	1106	0	7.20	12.5	1.3	2359	29.5
N50-0.3										300		8.0	1.0	2364	30.5
N50-1.5										1500		12.0	0.8	2371	30.0
N50-3.0										3000		12.0	0.3	2381	28.5
N65-0	65	45.0				276	0	826	1053	0	5.52	11.0	-0.7	2388	-
N65-0.3										300		15.0	0.1	2368	30
N65-1.5										1500		14.0	-0.1	2372	30.0
N65-3.0										3000		12.0	0.0	2371	30
F50-0	50	40.0				288	55	700	1096	0	7.20	8.0	-1.1	2385	28
F50-0.3										300		11.0	0.9	2351	27
F50-1.5										1500		15.0	1.0	2349	28.0
F50-3.0										3000		14.0	-0.2	2376	28
F65-0	65	45.0				221		820	1046	0	5.52	18.0	-0.5	2370	27
F65-0.3										300		17.5	-0.8	2377	27.5
F65-1.5										1500		17.0	-0.6	2372	28.0
F65-3.0										3000		17.5	-0.5	2369	28

* 空気量はフレッシュコンクリートの単位容積質量より算出した

よる)・質量減少率算出を行った。

3. 実験結果

3.1 鉄筋の発錆状況

鉄筋は1体の試験体につき4本入っているため、計64本について調査した。N50-0.3の鉄筋と発錆状況のスケッチを図2に示す。4本の鉄筋の発錆状況は試験体ごとに異なる。図2の鉄筋は上から5mm, 10mm, 20mm, 30mmの順に並んでいる。4本すべての鉄筋表面全体に発錆している試験体もあれば、4本とも発錆状況が違う試験体、4本すべての鉄筋において発錆があまりみられない試験体があった。錆は鉄筋両端から鉄筋中央部に向けて進行する傾向がみられた。

3.2 鉄筋の腐食面積率と質量減少率

発錆状況のスケッチから画像解析により、鉄筋表面積に対する腐食面積率を算出した。また鉄筋を10%クエン酸水素二アンモニウム水溶液(20℃)に、1日～数日間浸透させ錆落としを行い、質量減少率を算出した。

発錆面積率・質量減少率ともに鉄筋腐食の度合いをみる指標のひとつである。腐食面積率と質量減少率を図3に示す。腐食面積率と質量減少率で相関関係がみられた。また、図3の腐食面積率100%の鉄筋において質量減少率に大きな差がみられた。このことから、複数の鉄筋が表面の発錆にとどまらず、鉄筋内部まで錆が進行していることがわかる。腐食面積率は鉄筋表面のみで割合を出すため、以下各種要因を質量減少率によって検討した。

3.3 質量減少率

3.3.1 各種要因と質量減少率

各種要因(かぶり厚さ、中性化深さ、水セメント比、塩化物含有量)と質量減少率を比較する。各種要因と質量減少率で直線回帰式と相関係数を求めた。表4に示す。また、各種要因と質量減少率の関係を散布図で図4に示す。今回比較した要因すべてにおいて、弱い相関関係がみられた。相関係数の絶対値が大きい順にかぶり厚さ、中性化深さ、水セメント比、塩化物含有量となった。全体の傾向として、かぶり厚さが小さい・水セメント比が大きい・塩化物含有量が多いほど質量減少率が大きくなる傾向がみられた。また、質量減少率

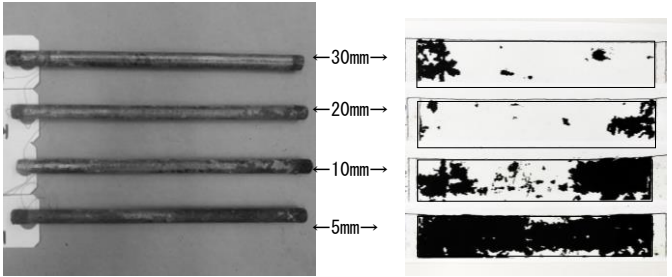


図2 鉄筋と発錆状況スケッチ(N50-0.3)

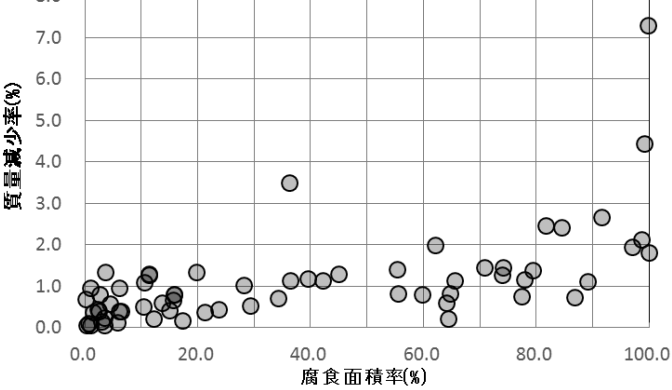


図3 腐食面積率と質量減少

表4 各種要因と質量減少率

	直線回帰	相関係数
かぶり厚さ	$y=(-0.0453)x+1.84$	-0.387
中性化深さ	$y=0.0815x+0.56$	0.350
水セメント比	$y=0.0312x-0.91$	0.309
塩化物含有量	$y=0.236x+0.82$	0.248

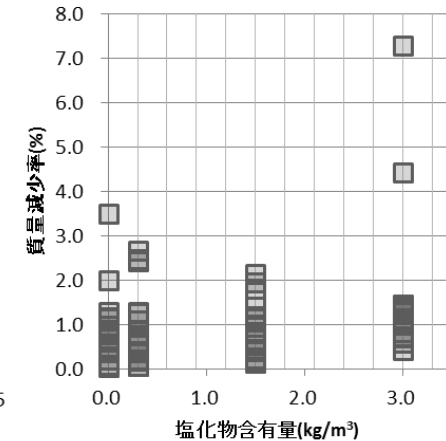
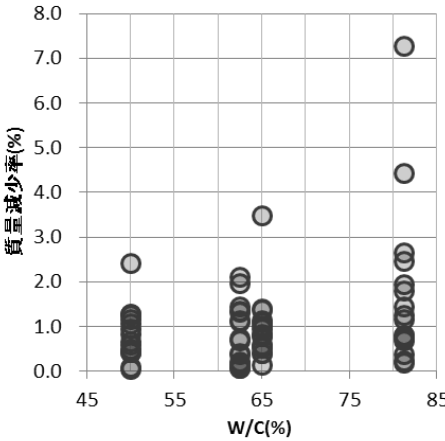
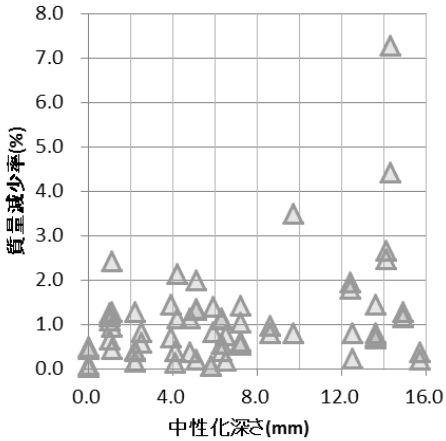
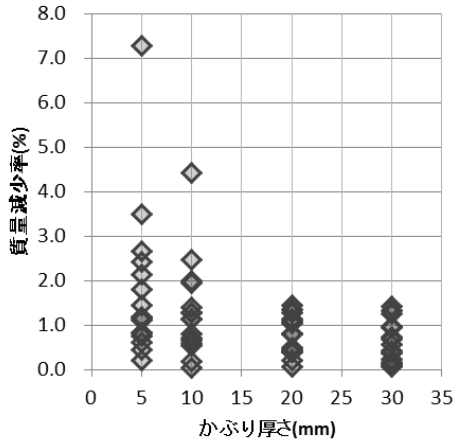


図4 各種要因と質量減少率

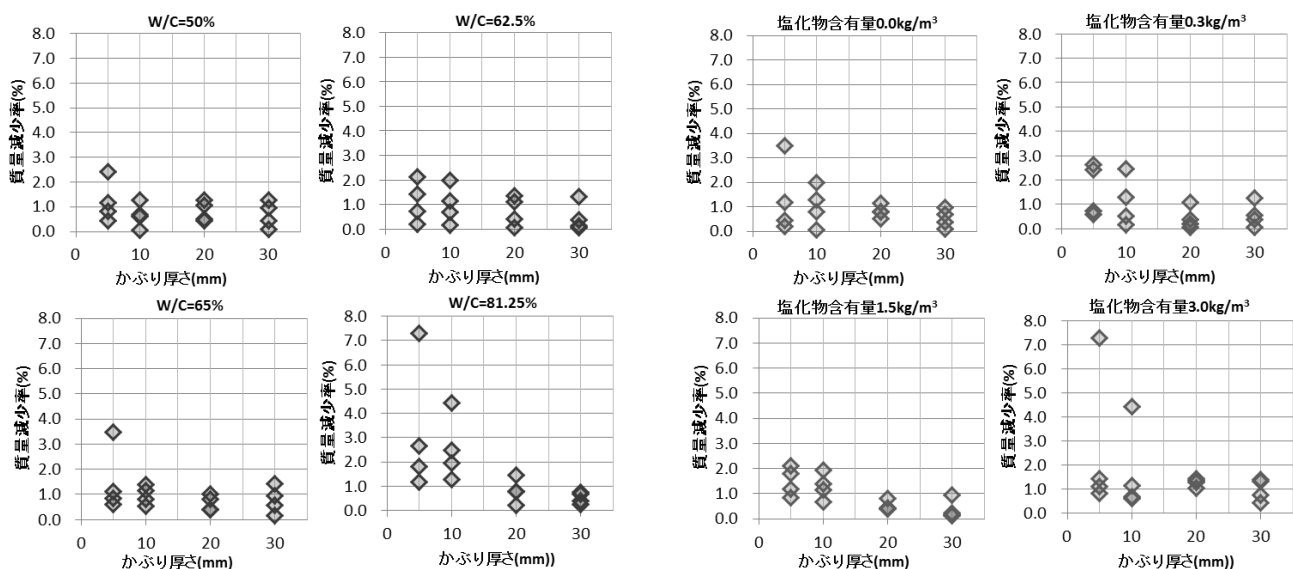


図5 かぶり厚さと質量減少率

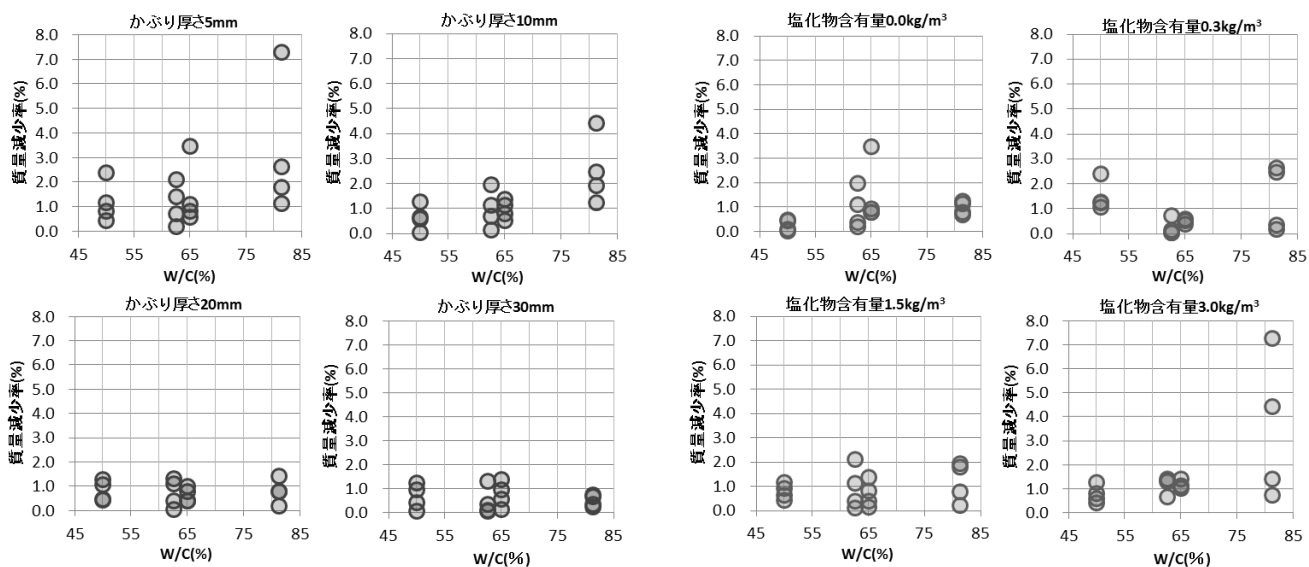


図6 水セメント比と質量減少率

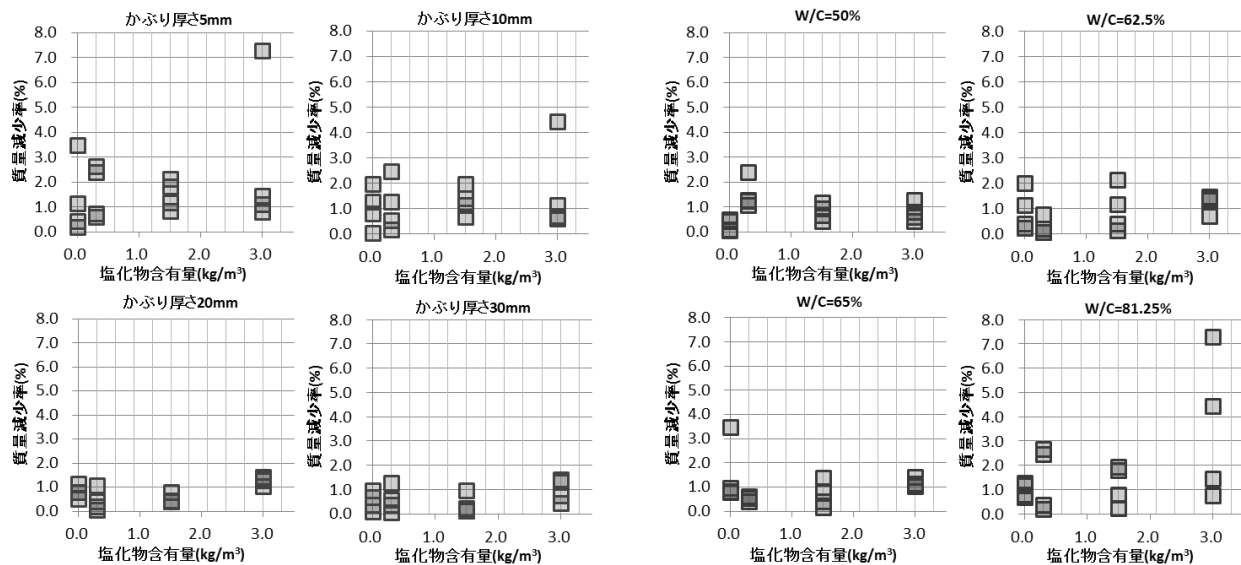


図7 塩化物含有量と質量減少率

表 5 各種要因別の相関係数

	かぶり厚さ別				水セメント比別				塩化物含有量別			
	5mm	10mm	20mm	30mm	50%	65%	62.50%	81.25%	0.0kg/m ³	0.3kg/m ³	1.5kg/m ³	3.0kg/m ³
かぶり厚さ					-0.239	-0.350	-0.382	-0.617	-0.35	-0.48	-0.745	-0.345
水セメント比	0.455	0.664	-0.005	-0.120					0.33	0.03	0.223	0.581
塩化物含有量	0.281	0.254	0.557	0.346	-0.01	0.009	0.354	0.346				

が大きい鉄筋が入っていた試験体において、コンクリートの中性化が進んでいる傾向がみられた。本実験の範囲では、鉄筋腐食の要因の中でかぶり厚さが最重要であることがわかった。以下、各種要因別に比較する。かぶり厚さと質量減少率の関係を水セメント比別・塩化物含有量別に図 5、水セメント比と質量減少率の関係をかぶり厚さ別・塩化物含有量別に図 6、塩化物含有量と質量減少率の関係をかぶり厚さ別・塩化物含有量別に図 7 に示す。また、各種要因と質量減少率を他の要因別で相関係数を求めた。表 5 に示す。

3.3.2 かぶり厚さと質量減少率

水セメント比別にみると図 5 より、W/C50%, 62.5, 65%においては質量減少率増加の傾きが緩やかで、W/C81.25%は増加の傾向が明らかにみられた。また表 5 より W/C50%, 62.5, 65%は弱い相関関係がみられ、W/C81.25%は相関関係が明らかにみられた。塩化物含有量別にみると図 5 より塩化物含有量が多いほど質量減少率の増加の傾きが大きくなる傾向がみられた。また表 5 より 0.0kg/m³, 0.3kg/m³, 3.0kg/m³では塩化物含有量が多いほど相関係数が大きくなっていったが、3.0kg/m³では相関係数が小さくなっていった。

3.3.3 水セメント比と質量減少率

かぶり厚さ別にみると図 6 より、かぶり厚さ 5, 10mm では水セメント比が大きいほど質量減少率が大きくなる傾向がみられた。かぶり厚さ 10mm よりも 5mm の方が水セメント比の増加による質量減少率の増加の割合が高いと思われる。かぶり厚さ 20mm でもわずかながこの傾向がみられた。かぶり厚さ 30mm ではこの傾向はみられず、質量減少率は横ばいである。また表 5 よりかぶり厚さ 5mm で弱い相関関係がみられ、かぶり厚さ 10mm では相関関係が明らかにみられた。かぶり厚さ 20, 30mm ではほぼ相関関係がみられなかった。塩化物含有量別にみると図 6 より、塩化物含有量 0.0kg/m³, 3.0kg/m³においては、水セメント比が大きいほど質量減少率が大きくなる傾向がみられた。塩化物含有量 0.3kg/m³, 1.5kg/m³においてはこの傾向がみられず値が横ばいになっていた。

また表 5 より塩化物含有量 0.0kg/m³, 3.0kg/m³においては弱い相関関係がみられ、0.3kg/m³, 1.5kg/m³においてはほぼ相関関係がみられなかった。

3.3.4 塩化物含有量と質量減少率

かぶり厚さ別にみると図 7 より、かぶり厚さ 5, 10mm では塩化物含有量が多いほど質量減少率が大きくなる傾向がみられた。かぶり厚さ 20, 30mm においてはこの傾向はみられず、質量減少率は横ばいである。また表 5 よりかぶり厚さ 5, 10mm においては、弱い相関関係がみられた。かぶり厚さ 20, 30mm

においてはほぼ相関関係がみられなかった。水セメント比別でみると図 7 より、W/C81.25%においては塩化物含有量が多いほど質量減少率が大きくなる傾向がみられた。W/C50%, 65%, 62.5%ではこの傾向があまりみられなかった。また表 5 より W/C50, 65%では弱い相関関係がみられたが W/C62.5, 81.25%ではほぼ相関関係がみられなかった。

4. まとめ

本実験では、19 年間日本で屋外暴露された試験体の鉄筋腐食状況を調査した。

本実験の範囲より、得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 鉄筋腐食は、鉄筋端部から徐々に鉄筋中央部に向かって錆の進行する傾向がみられた。これは試験体作製時に接いだモルタルの劣化が原因と考えられる。
- 2) 全体の傾向として、かぶり厚さが小さい・水セメント比が大きい・塩化物含有量が多いほど質量減少率が大きくなる傾向がみられた。
- 3) 質量減少率が大きい鉄筋が入っていた試験体においては、コンクリートの中性化が進んでいる傾向がみられた。
- 4) 鉄筋腐食の各種要因ごとに比較してもかぶり厚さ・水セメント比・塩化物含有量それぞれが互いに鉄筋腐食に関わっていることがわかった。
- 5) 本実験の範囲では、鉄筋腐食の要因の中でかぶり厚さが最重要であることがわかった。

なお、本実験と同時期に作製された同材料・同水準の暴露試験体がインドネシア・バンドンで暴露試験を継続している。今後そちらの調査が行われた際は、本実験のデータと併せて報告する予定である。

参考文献

- 1) 掛川 勝, 梶田 佳寛, 松林 裕二, 鹿毛 忠継: コンクリート中の鉄筋腐食速度に及ぼす各種要因の影響に関する長期屋外暴露実験 日本建築学会構造系論文集 第 77 巻 第 672 号 143-151 2012 年 2 月
- 2) 社団法人日本コンクリート工学協会: コンクリート中の鋼材の腐食評価方法 日本コンクリート工学協会規準集 2004 91-94