

鉄筋コンクリート構造の設計に用いる限界ひび割れ幅の物理的意味の検証

氏名：中武 昂誠

指導教員：下村 匠

1. はじめに

鉄筋コンクリート（RC）構造物の設計における限界ひび割れ幅は、主に鉄筋腐食の開始抑制を主眼としているが、腐食進行後の構造性能に対する有効性は未解明である。例えば、ひび割れ幅が小さければ、仮に鉄筋腐食が生じてもその進行は緩やかであり、鋼材断面の減少も均一広範囲に生じるため、部材全体の性能低下は平均的に進み比較的穏やかであると推測される。一方、ひび割れ幅が大きければ、ひび割れ部で局所的に著しい腐食が進行し、鉄筋の断面欠損が特定箇所集中することで、部材の耐荷力や変形性能が急激に低下する懸念がある。そこで本研究は、鋼材腐食の限界ひび割れ幅によるひび割れ制御が、鉄筋腐食が生じた後の構造性能の低下に対しても有効な意味を持つかを実験的に明らかにすることを目的とする。

2. 実験概要

本研究における実験では、RC 部材の力学特性の指標として荷重—変位関係および引張剛性を採用する。その理由は、鉄筋腐食の影響が鉄筋とコンクリートの双方に現れるためである。具体的には、腐食によって鉄筋の断面

積が減少することで部材の剛性が低下し、さらに腐食生成物の析出によって鉄筋とコンクリートの付着が損なわれることで、コンクリートの応力負担も減少することになる。

本実験では、あらかじめひび割れを導入した鉄筋コンクリート供試体に対して電食を用いて鉄筋腐食を生じさせた後、一軸引張試験を実施し、引張剛性を評価する。導入したひび割れ幅が小さい場合、鉄筋腐食による性能低下の度合いは小さいが、ひび割れ幅が限界値を超える場合には性能低下が著しくなることを実験によって確認する。

2.1 試験体の打設

実験に用いた RC 試験体の形状・寸法を図 1 に示す。RC 供試体は、図 1 に示すように 100×100×1000 mm の形状であり、断面の中心に D19 の鉄筋を 1 本配したものである。RC 供試体は引張載荷試験により生じるひび割れを複数本含んだ区間の平均ひずみを測定するために試験区間を中央部 1100 mm と設定し、試験区間のひずみに及ぼす供試体端部からの鉄筋の抜出しの影響を排除するために供試体長を 1500 mm とする。実験に用いたコンクリートの使用材料および配合を表 1 に示す。鉄筋

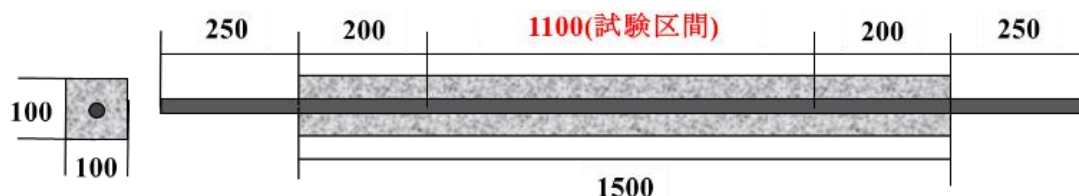


図-1 試験体寸法

は SD345 の異形鉄筋を用いる。

表-1 示方配合および使用材料

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
		W	C	S	G	Ad.
50	44	168	336	821	1085	1.68

使用材料

- C : 普通ポルトランドセメント, 密度 3.16 g/cm³
- S : 川砂, 表乾密度 2.61 g/cm³, 吸水率 1.92 %
- G : 碎石, 表乾密度 2.68 g/cm³, 吸水率 1.95 %, 最大寸法 20 mm
- Ad. : ポリカルボン酸エーテル系高性能AE減水剤 (C × 0.5 %使用)

2-2 ひび割れ導入方法およびひび割れ状況

28 日間の封かん養生終了後, 引張荷重によりひび割れを導入する。荷重方法について, 図 2 に模式図を示す。一軸引張試験を行う際にも, 同様の方法で行う。除荷後の表面のひび割れ幅が 0.1~mm 程度になるようにマイクロスコープでひび割れ幅を測定しながら荷重・除荷を繰り返し行う。表 2 に各試験体のひび割れ導入結果を示す。また, 図 3 に試験体に発生したひび割れの詳細図を示す。

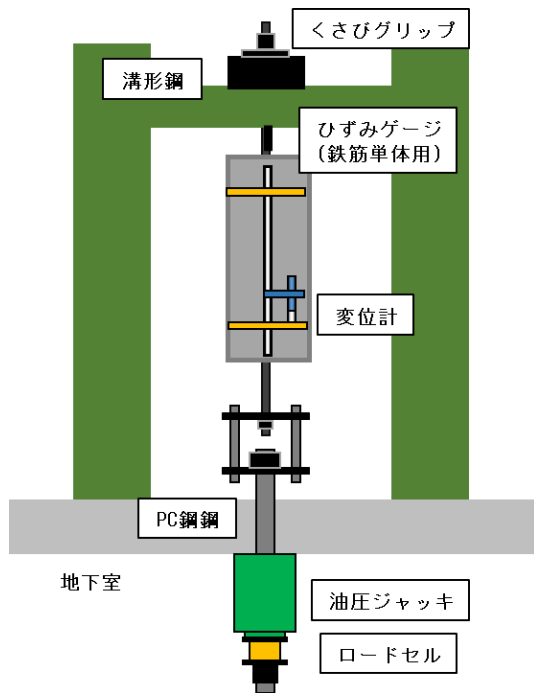


図-2 荷重方法

表-2 ひび割れ結果

試験体名	平均ひび割れ幅 (mm)	ひび割れ幅の範囲 (mm)
w_0.12	0.116	0.013~0.513
w_0.25	0.251	0.004~2.162
w_0.60	0.595	0.032~2.552
w_1.00	1.001	0.051~2.052

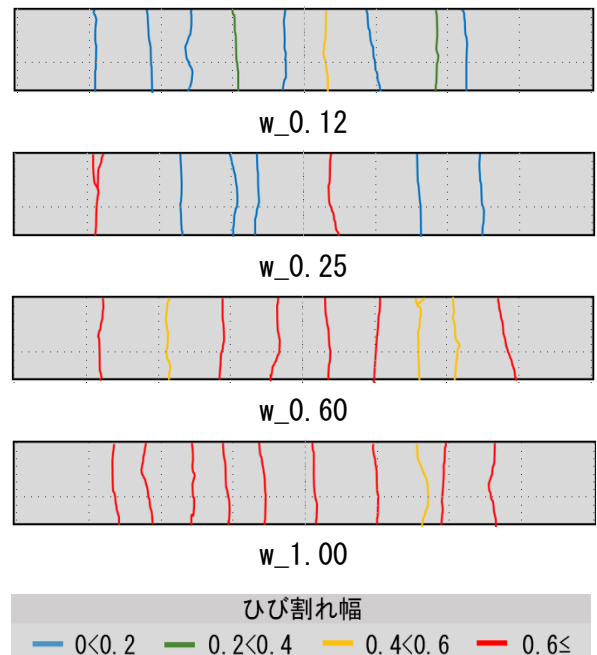


図-3 ひび割れ詳細図(打設面)

2-3 電食方法と腐食結果

本研究では, 鉄筋を短時間で効率的に腐食させるために, 電食法を採用した。供試体は濃度 3%の食塩水に浸漬し, 鉄筋をアノード極, 供試体下の銅板をカソード極として電流を流すことで腐食を促進した。鉄筋の突出部が意図しない腐食を受けないように, コンクリート部のみを食塩水に浸漬した。表 3 に積算電流量を示す。今回の実験では, すべての試験体において 280mA・h となるように設定し, これにより各試験体において同程度の腐食量であると判断した。

表-3 積算電流量

試験体	w_0.12	w_0.25	w_0.60	w_1.00
積算電流量 (mA・hr)	287.5	258.6	288.4	282.1

— 断面積 - - - 平均断面積 — ひび割れ位置

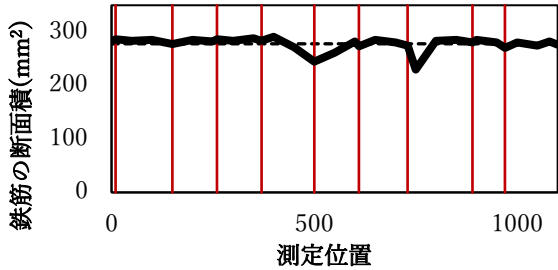


図-4 鉄筋断面積分布 (w_0.12)

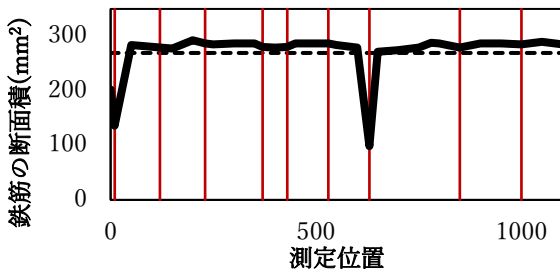


図-5 鉄筋断面積分布 (w_0.25)

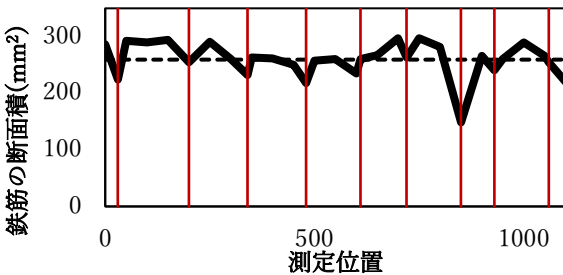


図-6 鉄筋断面積分布 (w_0.60)

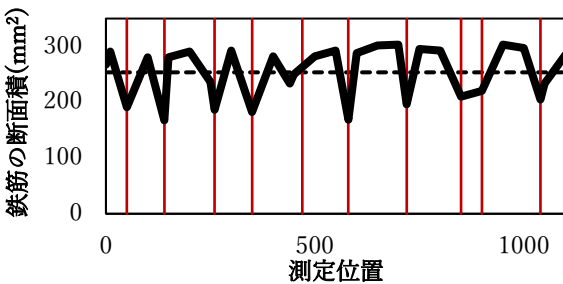


図-7 鉄筋断面積分布 (w_1.00)

腐食後の試験体から鉄筋をはつり出し、鉄筋の断面積を計測した。計測は、ノギスを用いて50 mm間隔とひび割れ発生位置の鉄筋の直径を計測し、断面積を算出した。算出結果を図4から図7に示す。

3. 鉄筋腐食後の構造性能

3.1 ひび割れが鉄筋の腐食分布に与える影響

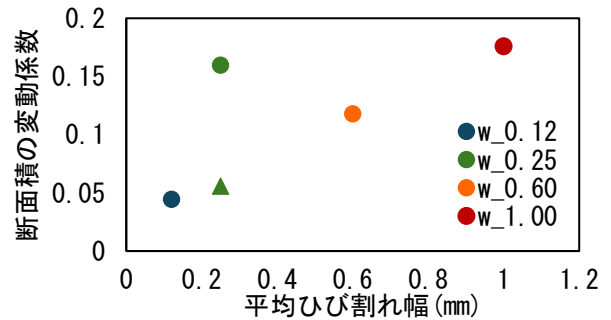


図-8 平均ひび割れ幅と断面積の変動係数

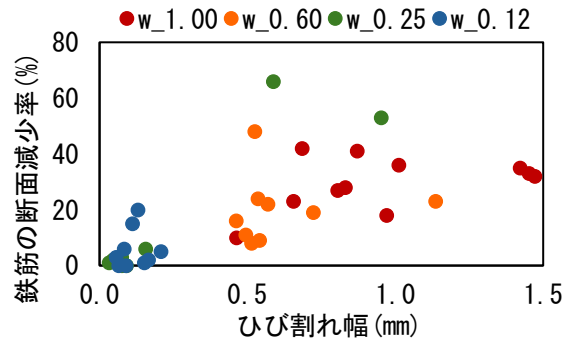


図-9 ひび割れ幅と断面減少率

ひび割れ幅が鉄筋の腐食分布に与える影響について、図8に平均ひび割れ幅と断面積の変動係数の関係を示す。変動係数は、腐食が鉄筋の軸方向に以下に不均一に進展したかを示す。図より、ひび割れ幅が大きくなるにつれて、鉄筋の不均一性も大きくなっていることがわかる。しかし、w_0.25の試験体については例外的な挙動を示している。今回、w_0.25の試験体には、局所的に幅が大きなひ

び割れが発生しており、その箇所の断面欠損が鉄筋の不均一性に大きな影響を与えている。例外的に発生したひび割れの影響を除いた変動係数を図中の三角の点で示す。また、**図 9** に各試験体に生じたひび割れ幅とそのひび割れ位置における鉄筋の断面減少率の関係を示す。図より、ひび割れ幅に応じて、鉄筋の断面減少率も増加していることを確認した。

3.2 ひび割れが構造性能に与える影響

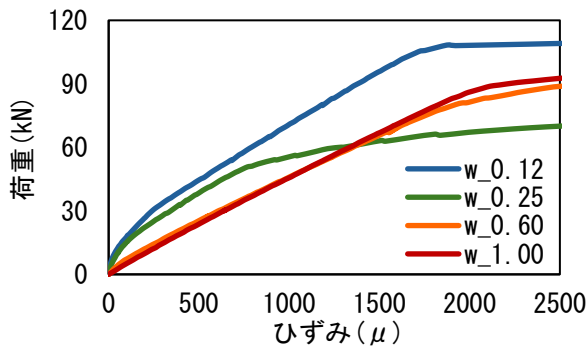


図-10 荷重—ひずみ関係

図 10 に荷重—ひずみ関係を示す。今回の実験では、最も小さいひび割れ幅を有する w_0.12 が最も高い降伏荷重を示したのに対して、w_0.25 がもっとも低い降伏荷重を示した。これは、w_0.25 の試験体上に生じている局所的に大きなひび割れがもたらした、鉄筋の断面欠損によるものである。このことから、局所的な断面欠損によって部材の耐荷力が決定させることが考えられる。

図 10 での結果をもとに、次の処理を行い、付着によりコンクリートが負担する平均応力を求めることができる。コンクリートの平均応力は一軸引張試験より得られた荷重 P から、鉄筋が負担する荷重 P_s を差し引くことで算出した。算出方法を式(1)に示す。

$$\sigma_c = \frac{P - E_s A_{s,cor} \varepsilon}{A_c} \quad \text{式(1)}$$

ここに、

σ_c : コンクリートの平均応力(N/mm²)

P : 作用荷重(N)

E_s : 鉄筋の弾性係数(N/mm²)

$A_{s,cor}$: 腐食後の鉄筋の平均断面積(mm²)

ε : 平均ひずみ

A_c : コンクリートの断面積(mm²)

また、鉄筋の腐食が RC 部材の力学挙動に及ぼす影響をより明確にするため、腐食のない試験体と腐食のある試験体の挙動を比較・検討する。腐食させていない試験体を、一軸引張による繰り返し载荷を行い、各荷重段階におけるひび割れ幅を測定した。この手法により、腐食させた各試験体と同等のひび割れ幅を有している段階での荷重—変位関係およびコンクリートの平均応力を抽出することが可能となる。これにより、断面減少や付着劣化といった「腐食の有無」のみが力学特性に及ぼす影響を純粋に抽出することを目的としている。腐食なしの試験体と腐食ありの試験体のコンクリートの平均応力を図 11 に示す。

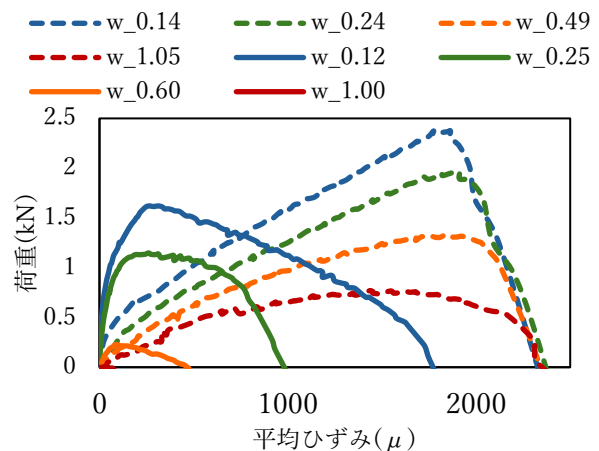


図-11 コンクリートの平均応力

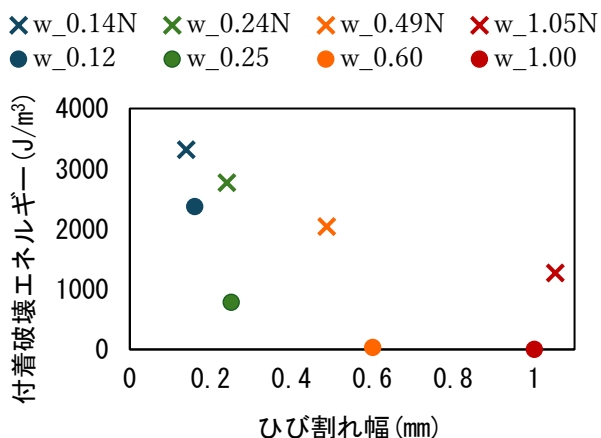


図-12 ひび割れ幅と付着破壊エネルギー

鉄筋の腐食と付着性状の定量的な関係をより明瞭に表すため、図 11 に示す曲線下に囲まれた面積を算出した。本研究ではこれを「平均付着破壊エネルギー」と呼び、鉄筋とコンクリートの付着性能を一元的に表す指標として定義する。図 12 にひび割れ幅と付着破壊エネルギーの関係を示す。図より、ひび割れ幅が小さな段階では、高いエネルギーを保持しているが、ひび割れが大きくなるにつれて、エネルギーが小さくなることを確認した。また、腐食させていない試験体の付着破壊エネルギーについて、図中のバツ印で示すことで、腐食のみによる影響を考察する。腐食させていない試験体と腐食させた試験体のエネルギー差を比較すると、ひび割れ幅が大きくなるにつれてエネルギー損失も大きくなることがわかる。

4. まとめ

本研究では、ひび割れ幅が鉄筋腐食後のコンクリート部材の構造性能に与える影響を評価した。得られた知見を以下にまとめる。

- ・今回の実験結果からは、ある特定のひび割れ幅を境に構造性能が急激に破綻するような

明確な一点（閾値）の発見には至らなかった。しかし、ひび割れ幅の増大に応じて、鉄筋の断面積の不均一性が増加し、部材の耐力や変形性能、付着性能といった構造性能が段階的に低下する傾向が明らかとなった。

- ・ひび割れ幅を制御することは、単に腐食開始を遅らせるだけでなく、ひび割れ位置における局所的な断面欠損を防ぎ、急激な耐荷力の低下を防ぐ、物理的な意味を持っていることを明らかにした。

[参考文献]

- 1) 松尾洋，五角亘，下村匠，鉄筋が腐食した鉄筋コンクリート部材の引張剛性，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.3，pp.1327-1332，2001
- 2) 工藤めい，下村匠，コンクリート部材への水の浸透・乾燥に及ぼすひび割れの影響に関する実験と数値解析，土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造)，Vol.75，No.3，pp.196-207