

論文 塩害劣化を受ける鉄筋コンクリートはりの耐荷性能に関する実験的研究

松田 耕作^{*1}・横田 優^{*2}・荻山 和樹^{*3}・松島 学^{*4}

要旨：実構造物と同様な塩害劣化を進展させた鉄筋コンクリートはり試験体を作製し、載荷実験を行い、鉄筋の腐食量－コンクリートのひび割れ程度－部材の耐荷性能の三者の対応関係について検討した。鉄筋の断面減少率 10%未満、コンクリートの腐食ひび割れ幅 1.5mm 程度未満の範囲で行った実験により、鉄筋の腐食程度とコンクリートの腐食ひび割れ幅との間には、パラツキはかなり大きいものの相関が認められた。また、終局時の耐力に急激な低下は認められなかったのに対して、じん性率の低下は顕著に認められた。

キーワード：載荷実験、鉄筋腐食、ひび割れ、曲げ、耐力、じん性率

1. はじめに

塩害による鉄筋腐食により劣化した鉄筋コンクリート構造物の耐荷性能を的確に把握することは、構造物を維持管理し長期にわたり有効活用するために重要である。構造物内部の鉄筋の劣化状況を直接的に知るには困難を伴うため、通常の点検では目視によるひび割れの状況から推定せざるを得ない。しかし、鉄筋の腐食量とひび割れ程度との関係はまだ明確とはなっていない。また、構造部材の耐荷性能と鉄筋腐食量との相関関係も完全には解明されてはいない。

近年、これらの問題を明らかにするための実験的研究が数多く行われるようになり、データが蓄積されつつある^{1), 2)}。しかし、試験体の劣化促進方法として多用されている電食では、鉄筋が軸方向に概ね均一に腐食すると言われ¹⁾、断面方向には局所的に腐食が集中するとされている³⁾。また、試験体に使用されている鉄筋も D13 以下の細径のものが多い。このように、鉄筋の腐食形態や鉄筋径が実構造物に近い条件で作製された試験体により断面減少率の大きい領域での耐荷性能を变形能力も含めて定量的に評価した事例は、まだ数少ない。

そこで、鉄筋の腐食量－コンクリートのひび割れ程度－鉄筋コンクリート部材の耐荷性能の三者の対応関係について検討するため、実構造物と同様な塩害劣化を進展させた鉄筋コンクリートはり試験体を作製した。そして、劣化程度の異なる試験体で載荷実験を実施し、その結果を腐食のない試験体と比較し、考察を加えた。

2. 実験概要

2.1 試験体

鉄筋コンクリートはり部材の主鉄筋の腐食により発

生するひび割れは、**図-1** に示すように、鉄筋間隔が広い場合には鉄筋に沿ったひび割れが発生し、狭い場合には鉄筋同士を繋ぐような水平方向のはく離ひび割れが発生しやすい。そこでこれら 2 種類のひび割れモードを想定し、試験体を作製した。

試験体の形状と配筋を**図-2** に示す。鉄筋の材質は SD345 で、主鉄筋 (D16) のかぶりは 25mm である。また、曲げ耐力に対してせん断耐力に十分な余裕を持たせるため、せん断補強筋 (D10) を 200mm 間隔で配した。

試験体のコンクリートの配合を表-1 に示す。鉄筋腐食を促進させるため、練り混ぜ水に NaCl 溶液を使用し、試験体中の塩化物イオン量が 5kg/m³ となるようにした。



(a) 鉄筋に沿ったひび割れ (b) 水平剥離ひび割れ
図-1 ひび割れモード

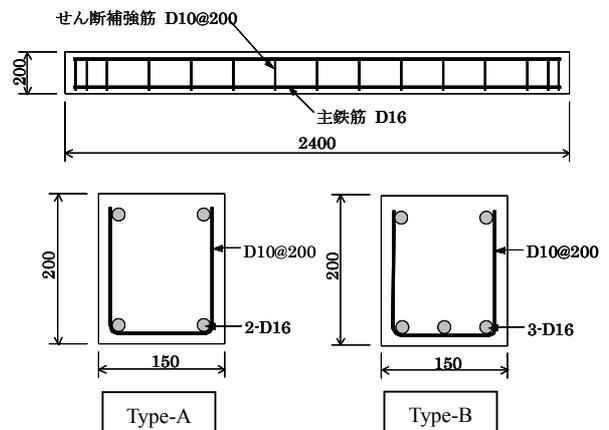


図-2 試験体の形状と配筋

単位：mm

*1 (株) 四国総合研究所 土木技術部主席研究員 工修 (正会員)

*2 (株) 四国総合研究所 土木技術部部長 工博 (正会員)

*3 四国電力 (株) 土木建築部土木技術グループ 工修

*4 香川大学 工学部安全システム建設工学科教授 工博 (正会員)

表-1 コンクリートの配合

粗骨材 最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	水セメント 比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)			
					水	セメント	砂	碎石
15	8±2	4.5±1	65	46	178	274	816	962

作製した試験体の鉄筋腐食を促進させ、コンクリートにひび割れを発生させた。腐食促進の方法として、コンクリート打設の約6週間後から水槽に入れ、海水(70℃)による浸漬と冷風(15℃)による乾燥とを3.5日ずつのサイクルで繰り返す乾湿繰返試験を実施した。その状況を写真-1に示す。



(a) 海水浸漬時



(b) 乾燥時

写真-1 乾湿繰返試験の状況

す。試験体全長にわたり顕著な腐食ひび割れが発生した後は、腐食生成物が海水へ流出するのを避けるため、常温の空气中に湿潤状態で保管した。

試験体底面の主鉄筋に沿ってコーナー部に発生した腐食ひび割れ幅の進展を10cm間隔で定期的に計測した。計測したひび割れ幅のバラツキの大きさを考え、特性値を85%とした最大ひび割れ幅を、試験体を代表する腐食ひび割れ幅とすることとした。即ち、図-3に示すように、上位から数えて全数(23個所×2列=46個所)の

15%に相当する順位(7番目)のひび割れ幅がそれに該当する。これが目標ひび割れ幅にほぼ到達したものから載荷実験を実施した。目標ひび割れ幅は、0mm, 0.4mm, 0.8mm及び1.6mmとした。0mmは鉄筋に腐食のない健全なもの、0.4mmは補修が必要とされる基準値となっているひび割れ幅であり⁴⁾、他はその倍数とした。

試験体の一覧を表-2に示す。各試験体の載荷実験ま

表-2 試験体一覧

Type	試験体 名称	鉄筋	代表腐食ひび割れ幅 (mm)	
			測定値	目標値
A	A-6	健全	0.0	0.0
	A-1	腐食あり	0.5	0.4
	A-4	腐食あり	0.8	0.8
	A-5	腐食あり	1.6	1.6
B	B-6	健全	0.0	0.0
	B-2	腐食あり	0.4	0.4
	B-5	腐食あり	1.0	0.8
	B-1	腐食あり	1.4	1.6

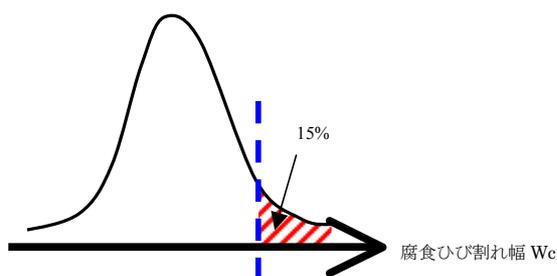


図-3 腐食ひび割れ幅の定義

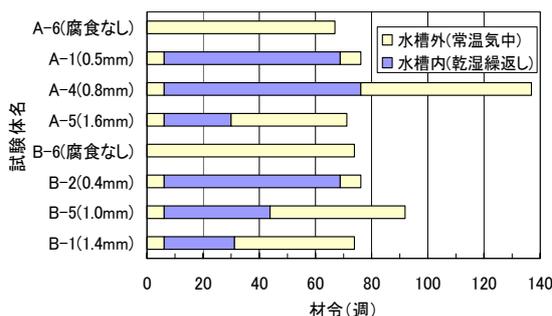


図-4 試験体の材令と環境条件

表-3 材料の物性値

コンクリート	圧縮強度	36.2 N/mm ²
	静弾性係数	29.4 kN/mm ²
	割裂引張強度	3.2 N/mm ²
主鉄筋 (D16)	降伏点	362 N/mm ²
	引張強さ	524 N/mm ²



写真-2 載荷実験の状況

での材令と環境条件を図-4に示す。鉄筋を腐食させない試験体は、載荷実験を実施するまで常温の空气中で保管し、実験終了後に鉄筋をはつり出して腐食のないことを確認した。

コンクリートと鉄筋の材料物性を表-3に示す。コンクリートの物性値は、練り混ぜ時に採取し、腐食促進を行ったはり試験体とほぼ同一の環境条件で保管した円柱供試体(φ100)による材令約70週時のものである。

2.2 実験方法

載荷方法及び計測位置を図-5に示す。また、実験の状況を写真-2に示す。載荷には、最大荷重100kNの加力載荷装置を用い、純曲げ区間長を400mmに設定した対称2点載荷

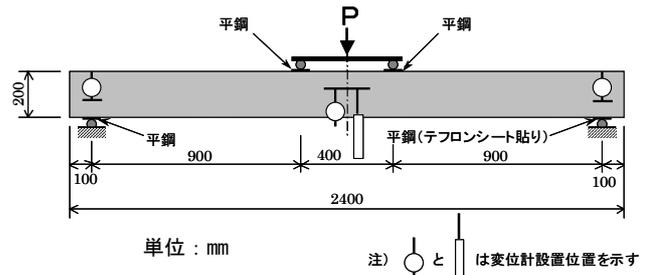


図-5 載荷方法及び計測位置

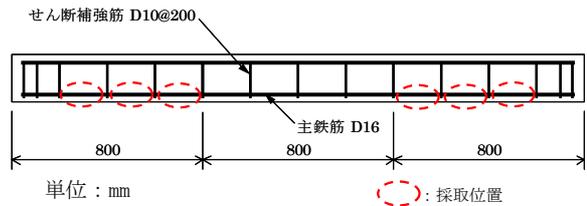


図-6 腐食減量測定のための鉄筋採取位置

表-4 実験結果一覧

試験体名 (腐食ひび割れ幅)	終局耐力 P_u (kN)	終局変位 δ_u (mm)	腐食減量 Δ (mg/cm ²)	断面減少率 C (%)
A-6 (腐食なし)	55.5	56.3	0.0	0.00
A-1 (0.5mm)	44.2	22.0	147.4	4.97
A-4 (0.8mm)	45.7	20.7	217.7	7.34
A-5 (1.6mm)	48.7	45.2	218.3	7.36
B-6 (腐食なし)	70.9	46.8	0.0	0.00
B-2 (0.4mm)	67.4	19.4	144.2	4.86
B-5 (1.0mm)	68.3	22.8	166.9	5.63
B-1 (1.4mm)	73.0	36.1	161.3	5.44

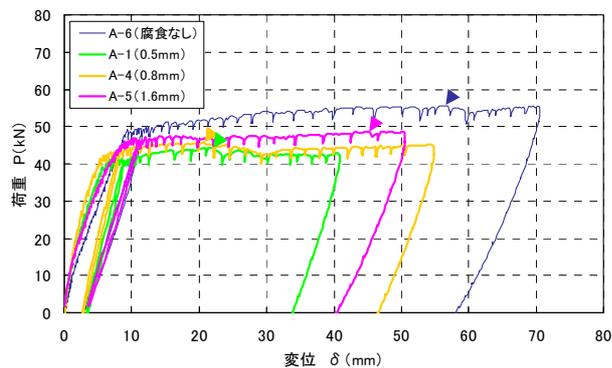
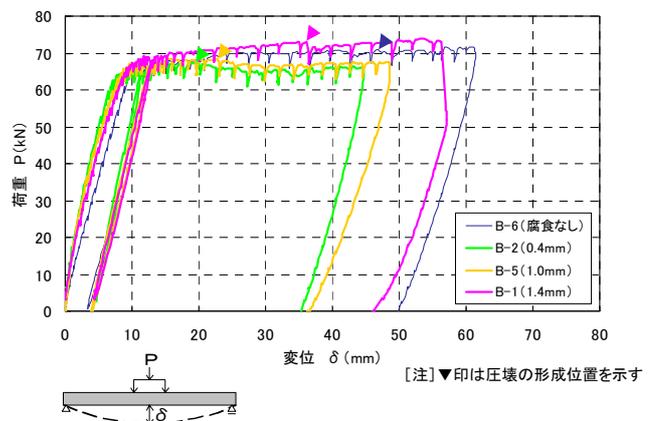


図-7 試験体の荷重-変位関係



とした。載荷の制御は、加力載荷装置の変位量を用いて行った。載荷に伴う試験体中央の変位量を変位計で計測した。

載荷実験終了後に鉄筋をはつり出し、腐食減量を測定した。鉄筋の降伏が生じていないと見なされる試験体両

端から80cm以内の範囲にある図-6に示す6個所の曲げ引張側(はり下端)の主鉄筋のうち4個所を選んで約14cmの長さに切断し、採取した。即ち、採取本数はType-A(主鉄筋本数2本)では試験体1体につき8本、Type-B(主鉄筋本数3本)では12本である。ただし、

試験体 A-4 については、6 箇所全てから全部で 12 本を採取した。採取した鉄筋を 10%クエン酸二アンモニウム溶液に浸し、恒温槽（40℃）に入れて、鉄筋の錆を除去した。腐食鉄筋の錆取り後の残存質量と腐食していない健全な鉄筋の質量との差から鉄筋の単位表面積当たりの腐食減量を求めた。また、鉄筋の腐食が鉄筋表面全体で均一に発生すると見なし、単位表面積当たりの腐食減量から逆算して腐食により減少した断面積を求め、これと腐食する前の断面積との比から断面減少率を算定した。

3. 実験結果

3.1 荷重－変位関係

試験体の荷重開始から終了までの荷重－変位関係を図-7に示す。

各試験体とも、荷重開始後荷重 10kN 未満でコンクリートの曲げひび割れ発生により若干剛性が低下した後耐力が上昇し、変位 10mm の手前付近で鉄筋降伏に伴う顕著な剛性低下を示し、その後は水平に近い勾配で変形が進行した。

図中の▼の印はコンクリート上面に圧壊が形成された位置を示している。圧壊形成後も試験体の耐力が上昇しているのは圧縮側主鉄筋の効果によるものであるため、コンクリートの圧壊形成時を各試験体の終局状態と見なした。

荷重開始から圧壊形成までの間にせん断破壊や付着破壊による急激な耐力低下は見られなかった。

終局耐力と終局変位の一覧を表-4に示す。

3.2 ひび割れ状況

実験終了後の各試験体のひび割れ状況を、鉄筋腐食のない試験体と比較して図-8に示す。荷重実験前に発生していた腐食によるひび割れを黒で、荷重によるひび割れを赤で示している。

実験終了後、ひび割れモードの確認を行った。試験体中央部の引張鉄筋をはつり出した様子を写真-3及び図-9に示す。錆の流出した形跡から、Type-A では水平はく離ひび割れは発生しているもののひび割れ同士は繋がっていない。これに対し、Type-B では水平はく離ひび割れ同士が繋がっている。両タイプともに図-1で想定



写真-3 引張鉄筋付近の状況

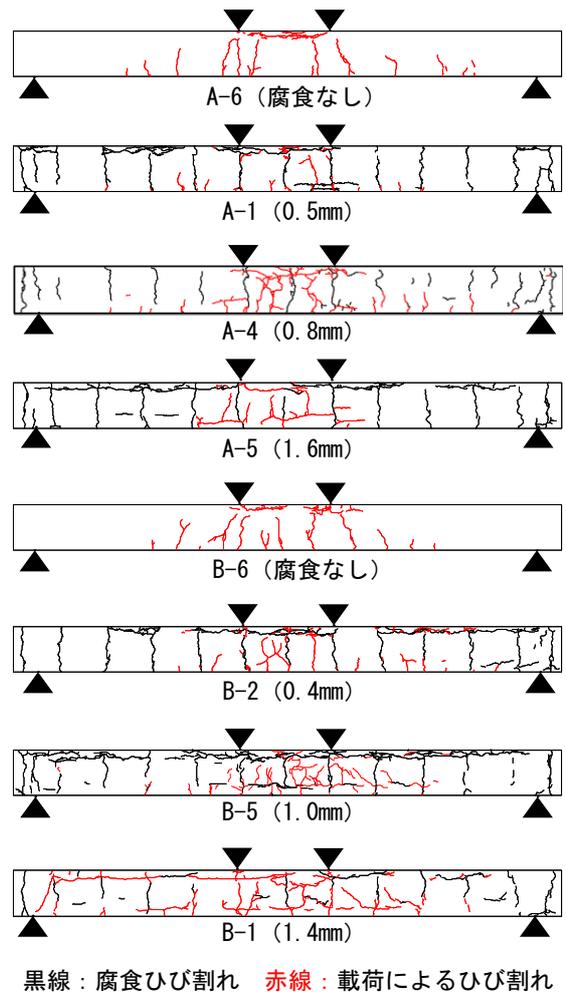


図-8 実験終了後の試験体のひび割れ状況

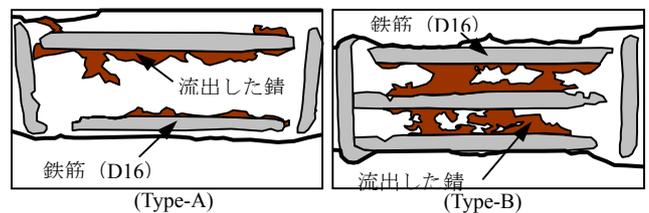


図-9 引張鉄筋付近の状況 (スケッチ)

したひび割れモードを再現できたと判断される。

3.3 鉄筋腐食量

鉄筋の単位表面積当たりの腐食減量及び断面減少率と、鉄筋採取位置における個々の腐食によるひび割れ幅との相関関係を図-10に示す。また、試験体の代表腐食ひび割れ幅との相関関係を図-11に示す。Type-B試験体の引張側中央の主鉄筋に沿って発生した腐食ひび割れは、コーナー部の主鉄筋沿いに発生した腐食ひび割れに拘束され、ひび割れ幅がほとんど広がらない。また、中央の主鉄筋はコーナー部の主鉄筋とは腐食の境界条件が異なることから、図-10及び図-11では、Type-Bの中央部から採取した鉄筋のデータは省いている。

採取した全ての鉄筋片の測定値から算出した腐食減量及び断面減少率の各試験体ごとの平均値を表-4に示

す。

4. 実験結果の考察

4.1 ひび割れ性状

(1) ひび割れの進展

図-8 に示したように、鉄筋が腐食していない試験体では、純曲げ区間で曲げひび割れが垂直方向に入り、その両側のせん断スパンで曲げせん断ひび割れが斜めに入るという対称2点载荷による鉄筋コンクリートはりの典型的なひび割れパターンを示している。これに対して、鉄筋の腐食した試験体では、载荷によって純曲げ区間に発生した曲げひび割れの本数が少ない。また、せん断スパンでの斜めひび割れは発生していない。

鉄筋が腐食した試験体の载荷によるひび割れは、元々発生していた腐食ひび割れの影響を受け、载荷による破壊エネルギーが新たなひび割れを発生させるよりも既存のひび割れの幅を広げる方に働くためと考えられる。また、鉄筋の腐食膨張により潜在的に発生していたひび割れが载荷により表面に現れたと考えられるひび割れも見られる。

(2) 鉄筋腐食量とコンクリートのひび割れ幅との関係

図-10 及び図-11 に示したように、鉄筋の腐食程度とコンクリートのひび割れ幅との間には正の相関関係のあることが窺える。しかし、バラツキは非常に大きい。また、Type-B に比べて Type-A の方が同程度のひび割れ幅に対する鉄筋腐食量がやや大きめの傾向が見られる。この差については、ひび割れモードの違いよりも図-4 に示した実験までの環境条件や材令の違いが大きく影響しているとも考えられるが、今後データ数を増やして検討する必要がある。

今回は試験体内部の腐食劣化程度の指標値を表面に現れたひび割れ幅で代用させ、ひび割れ幅測定値の順位のみから試験体の代表値を与えて評価した。今後は、ひび割れ幅分布のバラツキも考慮した指標値も模索し、鉄筋の腐食程度とひび割れ幅との相関を定量化することを検討する必要がある。

4.2 耐荷性能

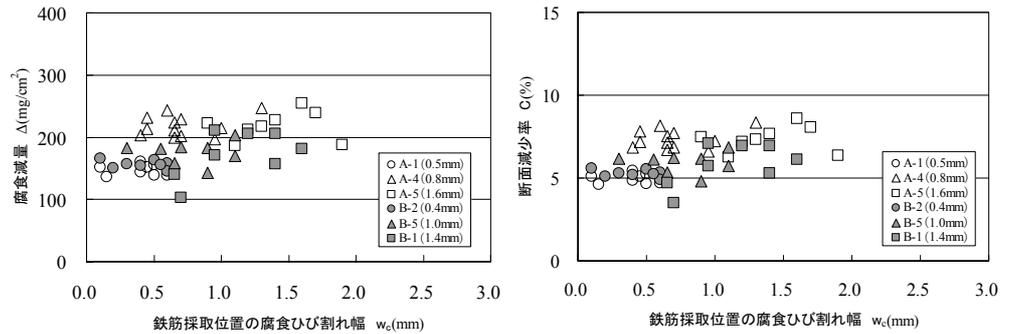


図-10 鉄筋腐食量と鉄筋採取位置の腐食ひび割れ幅との関係

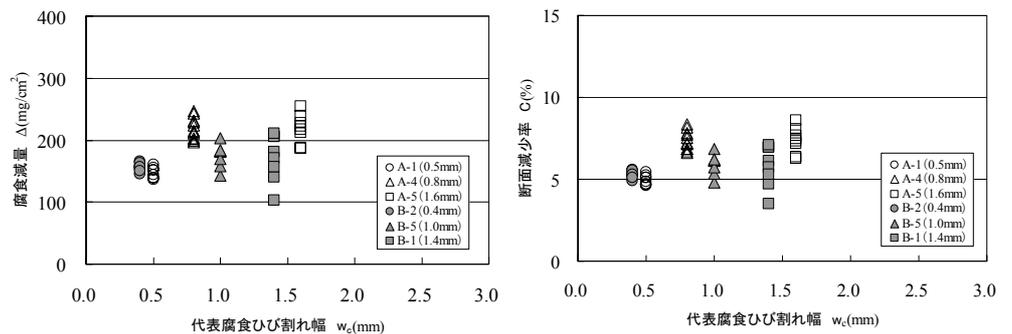


図-11 鉄筋腐食量と代表腐食ひび割れ幅との関係

(1) 耐荷力の低下

試験体の終局耐力（コンクリートの圧壊形成時の耐力）と腐食程度との関係を図-12 に示す。図-12 では、腐食のない試験体を基準として各試験体の終局耐力がどの程度低下しているかを示すために、終局耐力残存比 R_u を指標として用いた。終局耐力残存比は、式(1)で定義される。

$$R_u = \frac{P_i}{P_0} \quad (1)$$

ここで、 P_i は腐食した試験体の終局耐力の実験値であり、 P_0 は腐食のない試験体の終局耐力の実験値である。

腐食量が多いほど終局耐力は低下していく傾向が窺えるが、急激な低下は見られない。試験体の平均断面減少率で7%程度までの腐食に対する低下率は10~20%程度である。

また、Type-A と Type-B との比較では、主鉄筋の本数が少ない Type-A の低下率の方が若干大きめとなっている。これは、鉄筋本数が少ないと鉄筋総断面積のバラツキが大きく総断面積が小さい個所の生じる確率が高くなり、終局耐力がこれに支配されることが原因と考えられる。

(2) じん性の低下

部材の弾性範囲を超えるような外力が構造物に作用した時、終局耐力が同等であっても、非線形領域での部材の変形能力に乏しい構造物は、変形能力に富む構造物

に比べ崩壊に至る可能性が高い。そのため、例えば土木学会のコンクリート標準示方書では、部材の変位の限界値（終局変位）を適切に設定し応答変位がこれを下回るかどうか確認することが定められている⁵⁾。

部材の変形能力を表す指標として「じん性率 μ 」が用いられる。じん性率 μ は、この実験では試験体の終局状態（コンクリートの圧壊形成時）の変位 δ_u と引張鉄筋降伏時の変位 δ_y との比 δ_u/δ_y で定義される。鉄筋の腐食した試験体では引張鉄筋降伏による荷重-変位関係の剛性変化が明瞭に現れず、鉄筋の降伏を判定することが困難である。そこで、本研究では、腐食による鉄筋の断面減少を考慮して計算した引張鉄筋降伏時の変位を δ_y としてじん性率を求めた。そして、終局耐力の時と同様に、腐食のない試験体を基準としてじん性率がどの程度低下しているかを示すために、じん性率残存比 R_t を算定した。じん性率残存比は、式(2)で定義される。

$$R_t = \frac{\mu_i}{\mu_0} \quad (2)$$

ここで、 μ_i は腐食した試験体のじん性率、 μ_0 は腐食のない試験体のじん性率である。じん性率残存比 R_t と断面減少率 C との関係を図-13に示す。

腐食した試験体では、じん性率残存比が50%程度以下のものが半数以上を占めており、終局耐力がそれほど急激には低下しないのに対して、じん性率の低下は顕著に認められる。

5. まとめ

実構造物と同様な塩害劣化を進展させた鉄筋コンクリートはり試験体を作製し、荷重実験を行い、鉄筋腐食量-コンクリートのひび割れ程度-部材の耐荷性能の三者の対応関係について検討した。その結果、鉄筋の断面減少率10%未満、コンクリートの腐食ひび割れ幅1.5mm程度未満の範囲では、次に示す結果が得られた。

- (1) 鉄筋の腐食した試験体では、荷重によるひび割れは元々発生していた腐食ひび割れの影響を受け、鉄筋の腐食していない試験体とは異なったひび割れ性状を呈した。
- (2) 鉄筋の腐食程度とコンクリートの腐食ひび割れ幅との間には、バラツキはかなり大きいものの正の相関関係のあることが認められた。
- (3) 鉄筋腐食量の増加に伴う終局耐力の急激な低下は認められず、10~20%程度の低下であった。
- (4) 鉄筋腐食量の増加に伴うじん性率の低下は顕著に認められた。

今後は、解析的な検討も加えて、鉄筋の腐食量-コンクリートのひび割れ程度-部材の耐荷性能の三者の対

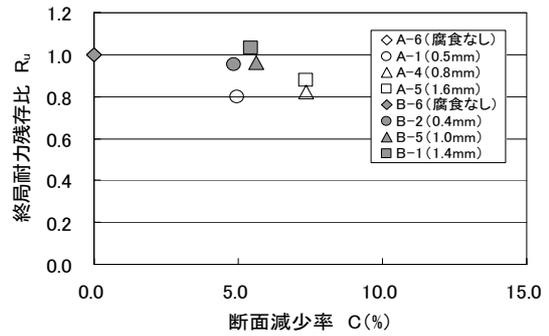


図-12 鉄筋腐食による終局耐力の低下

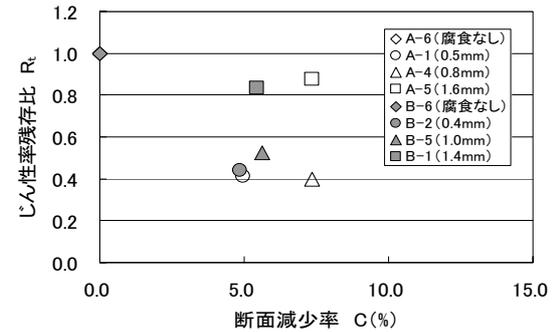


図-13 鉄筋腐食によるじん性率の低下

応関係をより明確にしていく予定である。

謝辞 本研究では、実験時の計測や実験データの整理において、田中大博氏（現奥村組）、田中秀周氏（現東亜建設工業）ほかの香川大学学生諸氏には多大なご尽力をいただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 土木学会コンクリート委員会 材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能研究小委員会：コンクリート技術シリーズ No.71 材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能，土木学会，pp.12-56，2006.9
- 2) 日本コンクリート工学協会 セメント系材料の時間依存性挙動に関する研究委員会 耐久性力学 WG：コンクリート構造物の耐久性力学，日本コンクリート工学協会，pp.211-225，2007.12
- 3) 松島 学，横田 優，関 博：鉄筋腐食膨張によるひび割れ発生時の腐食量，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.2，pp.1669-1674，2004
- 4) 日本コンクリート工学協会：コンクリートのひび割れ調査，補修・補強指針-2003-，pp.61-83，2003.6
- 5) 土木学会コンクリート委員会 コンクリート標準示方書改訂小委員会：2002年制定 コンクリート標準示方書 [耐震性能照査編]，土木学会，pp.11-20，2002.12