

鉄筋腐食が鉄筋コンクリート接合部の構造性能に及ぼす影響に関する研究

佐藤 文則¹・岩波 光保²・横田 弘³

¹正会員 前田建設工業(株)技術研究所(〒179-8914 東京都練馬区旭町 1-39-16)

²正会員 工博 独立行政法人 港湾空港技術研究所 構造強度研究室(〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1)

³フェロー会員 工博 独立行政法人 港湾空港技術研究所 構造強度研究室長(同上)

本研究は、応力状態が厳しい鉄筋コンクリート接合部に着目し、内部鉄筋が腐食した場合の構造性能を評価することを目的とした。実験は接合部を模擬したT形試験体を対象として、電食により内部鉄筋の腐食度を変化させ、載荷試験により耐荷性や変形性に与える影響を調査した。その結果、鉄筋の腐食が耐荷力および変形性に及ぼす影響は、鉄筋の断面欠損率と付着性能の低下を考慮することにより解析的に評価できることを示した。また、劣化に伴う構造性能の変化を非破壊試験により評価することを目的として、アコースティック・エミッション計測および電気化学的計測を適用し、接合部内部の劣化情報を検討した。

Key Words : structural performance, cross-sectional loss, bond performance, localized deformation, FEM, nondestructive testing, half-cell potential, polarization resistance, acoustic emission

1. はじめに

これまで我が国においては、長期間にわたる社会基盤整備のもと、様々な土木構造物が構築されてきた。そこでは、鉄筋コンクリート構造物が主要な役割を果たしてきている。一方、鉄筋コンクリート構造物は、構築完了直後から周辺環境の影響を受け経年的に劣化し、構造物が保有する性能も徐々に低下していく。鉄筋コンクリート構造物の劣化は、塩化物イオン、炭酸ガス等のコンクリート内部への浸透に起因する内部鉄筋の腐食や、凍結融解作用、酸による侵食等のコンクリート材料そのものの劣化が考えられる。特に海洋環境下に構築される港湾コンクリート構造物は、有害な塩化物イオンの影響を周辺環境より絶えず受けることになり、構造物にとって最も厳しい環境条件の一つであるといえる。

鉄筋コンクリート構造物に過剰な塩化物イオンが蓄積すると、コンクリート内部の鉄筋が腐食し始める。その腐食生成物の膨張圧によりコンクリートにひび割れが発生し、さらにはかぶりコンクリートの剥落現象に至る。このような塩害劣化の進行に応じて、構造物の耐荷性・変形性といった構造性能も低下することになる。これに対しては、日常の維持・管理が重要であり、必要に応じて適切な補修・補強

対策を講じる必要がある。日常の維持・管理より得られる情報から、構造物の補修・補強対策を実施するにあたり、構造物の機能を回復させる上で、ライフサイクルコストの観点からも、最も効果的な補修・補強の時期および方法を選定する必要がある。しかし、これまでは、目視観察結果に基づいた定性的かつ主観的な情報により構造物の損傷状態を判断し、補修・補強方法を決定しているのが現状である。したがって、客観的なデータにより、鉄筋やコンクリートの損傷状態を判断し、その結果に基づき構造物の保有性能がどの程度低下しているのかを定量的に評価し、補修・補強の時期・方法を選定することがより合理的である¹⁾。このような評価手法を構築する上で、構造物の損傷度と構造性能をつなぐ最も直接的な物理量は、鉄筋の腐食量と腐食位置である。鉄筋の腐食状態を非破壊試験の適用により定量的に評価し、構造物の各性能を適切に評価できる手法が必要である。このような観点に立ち、著者らは、これまでより試験体に電食を適用し、内部鉄筋の腐食度を種々に変化させ、定量的な劣化度判定への非破壊試験の適用性と構造性能への影響について検討してきた。これによれば、非破壊試験のひとつであるアコースティック・エミッション(AE)計測を適用すれば、低荷重レベルで相対的な損傷度を比較できる

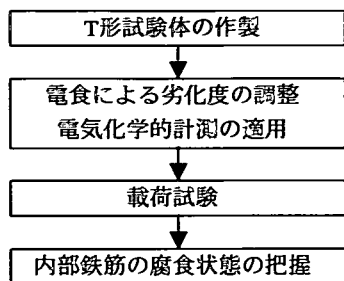


図-1 実験フロー

可能性があること、および鉄筋の断面欠損率と分極抵抗との間に良好な相関関係が存在し、損傷状態の定量化の可能性があることを示している。また、鉄筋の断面欠損率が5%を越えると、耐荷性能（鉄筋降伏荷重、終局荷重）が低下し、曲げひび割れ幅も大きくなるといった、構造性能を評価する上での有用な情報も得られている²⁾。

本研究では、応力状態が最も厳しいと考えられる鉄筋コンクリート部材接合部における内部鉄筋の腐食に着目し、鉄筋の腐食状態が部材の耐荷性、変形性等の構造性能に与える影響を実験的に検討した。また、鉄筋とコンクリート間の付着性能の低下を考慮し、有限要素法により解析的検討を行い、鉄筋腐食による鉄筋コンクリート部材の性能評価法に関して検討した。加えて、実構造物の損傷度を定量的に評価することを目的としてAE計測および電気化学的計測の適用性について検討した。

2. 実験概要

本実験は、RC部材接合部を模擬したT形試験体を用いて、電食期間を調整することにより部材の劣化度を変化させ、載荷試験により内部鉄筋の腐食度と構造性能の変化との関係を検討した。電食期間中には、経時的に電気化学的計測を実施した。図-1に実験フローを示す。

(1) 試験体諸元

実験に用いた試験体は、断面300×300mm、高さ1600mmの部材と断面300×400mm、長さ2000mmの部材をT形に接合したものである。図-2にT形試験体の形状・寸法および配筋を示す。主鉄筋には、D19 (SD345) の鉄筋を8本配置し、その端部に電食時の通電用および電気化学的計測用のリード線を接続した。なお、主鉄筋は接合面下部の梁部材に鉄筋とコンクリートとの付着力のみで定着されている。主筋

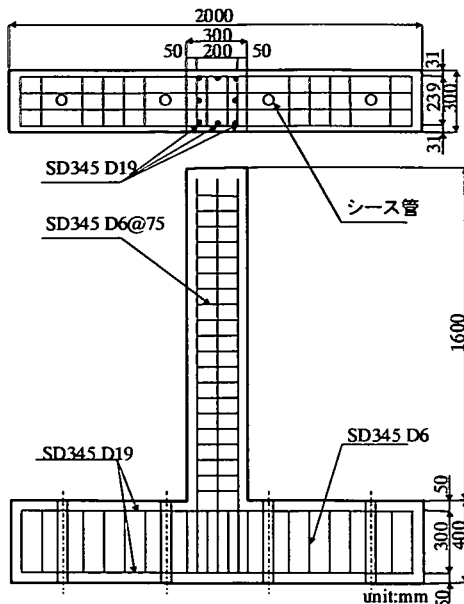


図-2 形状・寸法および配筋

表-1 鉄筋の材料試験結果

鉄筋種類	降伏強度 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)
主筋 D19 SD345	413	574
せん断補強筋 D6 SD345	391	585

表-2 コンクリートの配合

配合条件		単位量(kg/m ³)				
W/C (%)	s/a (%)	水 W	セ メ ン ト C	細 骨 材 S	粗 骨 材 G	AE 減 水 剤
49.5	41.8	161	326	749	1086	0.652

使用材料

水 : 回収水

セメント : 普通ポルトランドセメント 密度 : 3.16 g/cm³

細骨材 : 千葉県君津産 表乾密度 : 2.59g/cm³

吸水率 : 1.99% 粗粒率 : 2.60

粗骨材 : 青森県八戸産 表乾密度 : 2.71g/cm³

吸水率 : 0.27% 粗粒率 : 6.70

実積率 : 61.3%

のかぶり厚は50mmであり、接合面より75mmピッチでD6 (SD345) のせん断補強筋を配置した。表-1に使用した鉄筋の材料試験結果を示す。試験体に用いたコンクリートは、粗骨材の最大寸法が20mmで、呼び強度30N/mm²、スランプ12cm、空気量4%の普通コンクリートである。使用材料およびコンクリート

の配合を表-2に示す。なお、載荷試験時の圧縮強度およびヤング係数は、それぞれ 31.2N/mm^2 および $2.65 \times 10^4 \text{N/mm}^2$ であった。

(2) 電食方法および試験パラメータ

T形試験体接合部の劣化度を調整するため、柱部主筋に直流電流を強制的に印加し電食を施した。図-3に電食方法を示す。電食は図のように接合部を中心に厚さ0.3mmで寸法400mm×400mmのステンレス板を試験体両側面に配置し、定電流発生装置の陰極に接続した。また、試験体内部の主鉄筋に接続されているリード線を陽極に接続し、接合部の主鉄筋表面積に対して 8.5A/m^2 の電流密度となるように直流電流を印加した。電食時には接合部のコンクリートが湿潤状態を保つように絶えず海水を散水した。劣化度の調整は電食期間を変化させることにより行い、目視観察により縦ひび割れの発生状況すなわちひび割れ本数、ひび割れ幅、ひび割れ長さ、錆汁の発生状況等を総合的に判断して電食期間を設定した。試験パラメータである各試験体の劣化度は、「港湾構造物の維持・補修マニュアル³⁾」に示される劣化度判定の標準に従い、構造性能の比較基準である健全試験体を含めて、劣化度0, I, II, IIIの4水準とした。

(3) 載荷試験

RC部材接合部の鉄筋腐食を模擬したT形試験体の構造性能を把握するため、曲げ・せん断応力場で載荷試験を実施した。載荷試験時には、あわせてAE計測を行いRC部材接合部の劣化度とAE発生特性との関連を調べた。

a) 載荷方法および測定項目

図-4にT形試験体の載荷装置を示す。載荷は、T形試験体を反力床にPC鋼棒により固定し、反力壁に取り付けたジャッキにより行った。載荷位置すなわち曲げ・せん断スパンは、部材接合面から1400mmとした。載荷スケジュールは、曲げひび割れ発生荷重、引張主鉄筋が許容応力となる計算上の荷重(30kN)、20kN、鉄筋降伏荷重の各荷重レベルで載荷および除荷を繰り返し、その後終局状態に至るまで載荷した。なお、20kNの荷重レベルは、実構造物でのAE計測を考慮し、より低荷重レベルでのAE発生特性を検討するために設定した。各荷重レベルの繰り返し回数は、内部鉄筋の腐食状態の違いが2回目以降にAE発生数の多寡として現れる可能性があるため3回と設定した。図-5に載荷スケジュールを示す。また、鉄筋の降伏荷重は、荷重-変位曲線をリアルタイムでモニタリングし、荷重に対する変位の増分度で判定

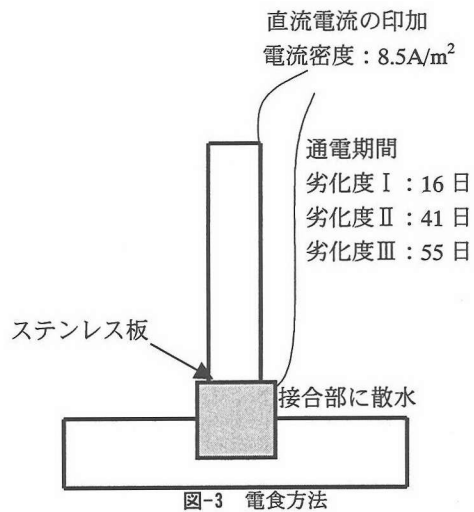


図-3 電食方法

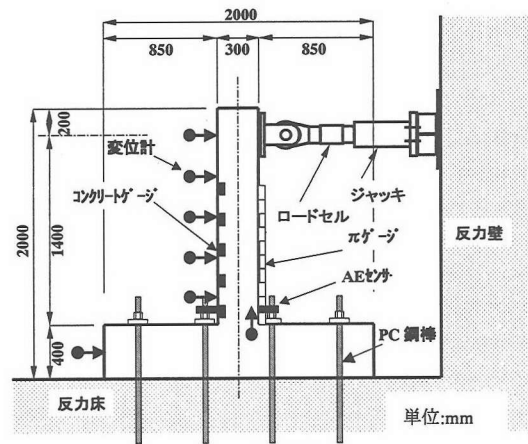


図-4 載荷装置

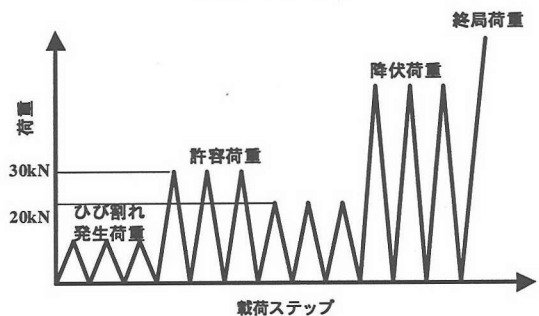


図-5 載荷スケジュール

した。これは、鉄筋にひずみゲージを貼付しても、電食により鉄筋が腐食するためにひずみゲージが損傷し、正しいデータが得られないことによる。測定項目は、載荷荷重、柱の水平変位、接合面での拔出量、圧縮縁のコンクリートひずみ、ひび割れ幅と

した。測定位置は図-4に示すとおりである。

b) AE計測

実構造物の損傷度を定量的に評価することを目的として、AE計測を行った。AEは、「固体材料内部の微小な破壊あるいはそれと同様なエネルギー解放過程によって発生する弾性波現象」と定義されるものである⁴⁾。AE計測を用いて構造体の損傷度を評価しようとする試みでは、そのほとんどが材料および部材の破壊荷重近くまで载荷を行い、レートプロセス解析などにより評価している。実構造物にAE計測を適用しその損傷度を評価する際には、荷重レベルの低い現実的な応力状態でAE特性を評価する必要がある。既往の研究²⁾によれば、鉄筋腐食が進行した試験体ほど低荷重レベルで多くのAEが検出され、これは鉄筋腐食に伴う試験体内部の損傷が進行したことにより、内部に多くの潜在的なAE発生源が形成・蓄積されたことに起因しているとされている。この現象を利用してRC部材の損傷程度を相対的に評価できる可能性を示している。

本研究では、上記知見をもとに载荷試験時にAE計測を行った。図-4に示すように、接合面より100mm上方の引張縁、圧縮縁それぞれにAEセンサを貼付して、鉄筋腐食によって損傷した接合部近傍のAEを計測した。用いたAEセンサは、60kHz共振型である。AEセンサで検出されたAE信号は、プリアンプで40dB増幅された後、メインアンプにて更に40dB増幅処理され、パソコン内部のメモリに記録された。また、検出されたAE信号には、プリアンプにて20kHzハイパスフィルターがかけられた。AE検出のしきい値は50dBとした。

(4) 腐食状態の評価

a) 腐食による鉄筋の断面欠損率

電食によって劣化させた接合部における鉄筋の腐食状態を定量的に把握するため、载荷試験終了後に主鉄筋をはつり出し、腐食減量を測定して鉄筋の断面欠損率に換算した。腐食生成物の除去は、1次処理として主鉄筋にサンドブラスト処理を施し、鉄筋に付着したコンクリートや腐食生成物を取り除いた。2次処理として、10%クエン酸水素二アンモニウム水溶液に鉄筋を浸漬し、腐食生成物を完全に除去した。除錆後、鉄筋の質量と長さを測定し、腐食していない鉄筋の単位長さ当たりの質量をもとに、断面欠損率を求めた。断面欠損率の測定は、接合面を基準に100mmピッチで主鉄筋を切断して行った。したがって、得られる断面欠損率は、接合面から100mm毎の平均的な値となっている。

b) 電気化学的計測法による腐食状態の推定

塩害により劣化した構造物の構造性能を定量的に評価する上で、コンクリート内部の鉄筋の腐食状態を腐食量や腐食範囲等の物理量として把握することは非常に重要である。現状では、既存構造物の維持・管理においては、「港湾構造物の維持・補修マニュアル³⁾」等の劣化度判定の標準をもとに、目視観察で得られるコンクリート表面からの情報により定性的に鉄筋の腐食状態を推定しているに過ぎない。したがって、内部鉄筋の腐食状態を非破壊試験により定量的に把握できることが、精度良い点検・調査の点で望ましい。内部鉄筋の腐食状態を非破壊的に推定する方法として、電気化学的計測法が挙げられる。電気化学的計測法の適用により自然電位や分極抵抗などが計測され、鉄筋の腐食状態を推定するための有効な指標が得られる。自然電位法は、塩化物イオンの浸入やコンクリートの中性化によって鉄筋が活性態となり、鉄筋が腐食するとその電位が卑方向へ変化する現象に基づいた方法であり、鉄筋の腐食箇所の検出や腐食の可能性を把握するのに有効である。分極抵抗は、鉄筋の腐食速度に関する情報を与え、理論的には分極抵抗の逆数の時間積分値と腐食量との間には相関関係がある。自然電位と分極抵抗を適切に計測できる技術と評価方法が構築できれば、非破壊的に構造性能を評価するための指標が定量的に与えられる。そこで本研究では、鉄筋の腐食状態を定量的に評価するための基礎資料を得ることを目的として、電食期間中に電気化学的計測法を適用して、自然電位および分極抵抗の計測を行った。計測は、電食による影響を排除するため、電食終了より2時間後に行った。自然電位の計測には、照合電極として飽和塩化銀電極を用い飽和硫酸銅電極基準に換算した。分極抵抗については、交流インピーダンス法に基づき高低2周波数による計測を行った。用いた周波数は10Hzおよび20mHzとし、印加電圧は10mVとした。本研究では、自動的に分極範囲を特定する機能を持つ、2重対極タイプのセンサを用いた⁵⁾。また、計測時にはコンクリート表面を海水で十分に湿らせ、コンクリートの含水状態をほぼ一定とした。計測対象は、接合面より上方の各主筋とし、せん断補強筋の影響を受けない位置にセンサを設置し、定点で経時的に計測を行った。

3. 実験結果

(1) 電食による内部鉄筋の腐食状況

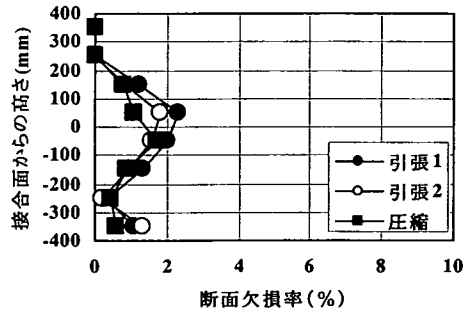
表-3および図-6に電食を施したT形試験体の鉄筋

表-3 電食による鉄筋の断面欠損率

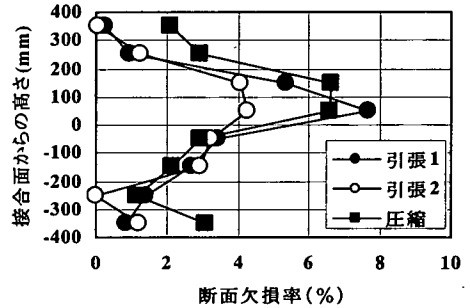
劣化度	接合面からの高さ(mm)	引張1 (%)	引張2 (%)	圧縮 (%)
I	300~400	0.00	0.00	0.00
	200~300	0.00	0.00	0.00
	100~200	1.22	0.83	0.80
	0~100	2.31	1.80	1.07
	-100~0	2.00	1.55	1.70
	-200~-100	1.33	0.93	0.87
	-300~-200	0.33	0.19	0.46
	400~-300	1.06	1.32	0.59
	平均	1.03	0.83	0.69
II	300~400	0.23	0.07	2.09
	200~300	0.94	1.22	2.93
	100~200	5.35	4.06	6.65
	0~100	7.65	4.25	6.58
	-100~0	3.44	3.23	2.91
	-200~-100	2.65	2.90	2.14
	-300~-200	1.40	0.00	1.15
	-400~-300	0.83	1.18	3.07
	平均	2.81	2.04	3.44
III	300~400	0.34	0.00	0.00
	200~300	2.44	1.24	1.14
	100~200	8.05	5.69	8.45
	0~100	7.28	6.77	7.13
	-100~0	3.50	2.70	1.98
	-200~-100	4.56	2.58	1.16
	-300~-200	2.51	1.54	0.96
	-400~-300	1.23	1.60	0.00
	平均	3.74	2.76	2.60

柱部断面図

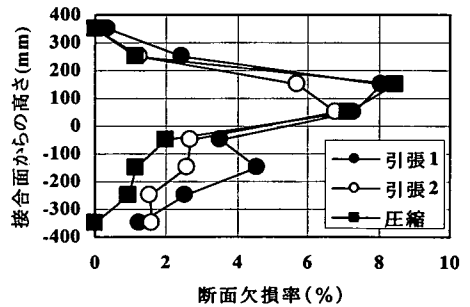
断面欠損率の分布状況を示す。ここで、断面欠損率は、載荷試験時の応力状態を考慮してグループ分けした3つの鉄筋群に対して求め、接合面からの高さごとに断面欠損率の平均値として整理した。断面欠損率は、接合面から200mmの範囲でその最大値が存在し、引張主鉄筋の平均断面欠損率も劣化度が進むにつれて大きくなっている。本実験の目的とした接合部の局所的な鉄筋の腐食促進を生じさせるには、



a)劣化度 I



b)劣化度 II



c)劣化度 III

図-6 断面欠損率の分布

今回の電食による方法は適当であったと言える。

また、劣化度 I の試験体は、接合部に腐食による縦ひび割れが発生した時点で電食を終了した試験体であり、この腐食量が、本試験体に対する縦ひび割れの発生限界であると考えられる。引張1の鉄筋に着目すると断面欠損率の平均値で1.03%、最大値で2.31%であり、既報告結果²⁾と概ね一致していた。各試験体に発生した縦ひび割れは、圧縮側および引張側に存在しており、その最大ひび割れ幅は、圧縮および引張側ともに劣化度 I で0.1mm、劣化度 II、III

表-4 劣化度の相違が耐荷性に与える影響

項目	劣化度				
	0	I	II	III	
断面欠損率 の最大値 (%)	引張 1	0.00	2.31	7.65	8.05
	引張 2	0.00	1.80	4.25	6.77
	圧縮	0.00	1.70	6.65	8.45
降伏荷重 の残存率(%)	100	97.1	96.5	95.5	
最大荷重 の残存率(%)	100	94.6	92.2	87.1	

で0.3mm程度であった。なお、接合面近傍に設置したせん断補強筋も電食作用による若干の腐食が目視により確認されたが、主筋とせん断補強筋を絶縁したため、非常に軽微な損傷であり、本実験ではせん断補強筋の断面欠損率の測定はしていない。

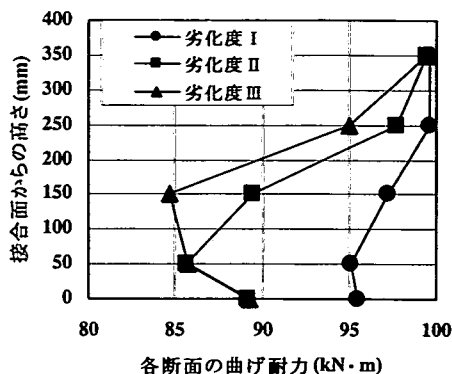
(2) 内部鉄筋の腐食と構造性能との関係

接合部の劣化度が異なるT形試験体の載荷試験を行い、内部鉄筋の腐食が構造性能に与える影響について、耐荷性・変形性およびひび割れ分散性の観点より検討を行った。なお、T形試験体の破壊モードは、接合部の劣化度・鉄筋の腐食程度に関わらず曲げ引張破壊となった。

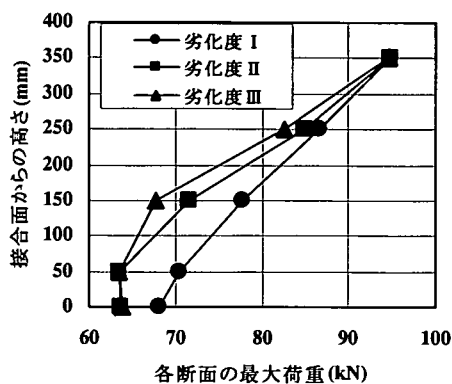
a) 耐荷性

表-4に劣化度の相違が鉄筋降伏荷重および最大荷重に与える影響を示す。なお、同表中の降伏荷重および最大荷重の値は、鉄筋が腐食していない劣化度0の場合を基準値100%とした残存率で示している。これより、鉄筋の断面欠損率の増加に伴い、鉄筋降伏荷重および最大荷重は、ともに低下していることが分かる。また、鉄筋降伏荷重の低下に比べて、最大荷重の低下割合が大きくなっており、鉄筋腐食の影響は応力レベルが高くなるにしたがい顕著になる傾向を示している。これは、内部鉄筋の腐食に起因する縦ひび割れの発生により、鉄筋とコンクリート間の付着性能が低下したために起こった現象と考えられる。すなわち、付着性能の低下によりコンクリートのテンションスティフニング効果が失われ、その結果、ひび割れの分散性が低下し、変形の局所化を招いたことによると考えられる。なお、3.(1)で示したように接合部付近のせん断補強筋は、電食による腐食が生じていたが、今回の試験では全ての試験体で曲げ引張破壊型の破壊モードとなったことから、せん断補強筋の腐食による耐荷力への影響は小さいと判断できる。

図-7に鉄筋の腐食が曲げ耐力に及ぼす影響を示す。ここでは、接合面からの高さに応じて実測の断面欠



a) 各断面の終局モーメント分布



b) 各断面が曲げ耐力に至る荷重分布

図-7 鉄筋の腐食が曲げ耐力に与える影響

損率を考慮し、各断面の曲げ耐力を計算した。なお、各断面の曲げ耐力を算出する際には、鉄筋の断面欠損率の影響に加えて、不均一な腐食によって発生する応力集中の影響を考慮したJCIリハビリテーション研究委員会報告書⁹⁾に示されている式(1)により、断面欠損率に応じて鉄筋の降伏強度を低下させた。

$$f_{ycorr} = (1.00 - 0.0132d_w) \cdot f_y \quad (1)$$

ここに、 f_{ycorr} は腐食した鉄筋の降伏強度、 f_y は腐食していない鉄筋の降伏強度、 d_w は鉄筋の断面欠損率(%)である。同図a)より各断面の曲げ耐力は、図-6に示した腐食による断面欠損率に応じて大きく変化していることが分かる。本実験の載荷条件において、作用曲げモーメントは接合面で最大となり、鉄筋が腐食していない健全な場合には、部材接合面の断面性能で降伏および最大荷重が決定されることになる。しかしながら、各断面の曲げ耐力分布から分かるように、部材軸方向に対して曲げ耐力は一律で

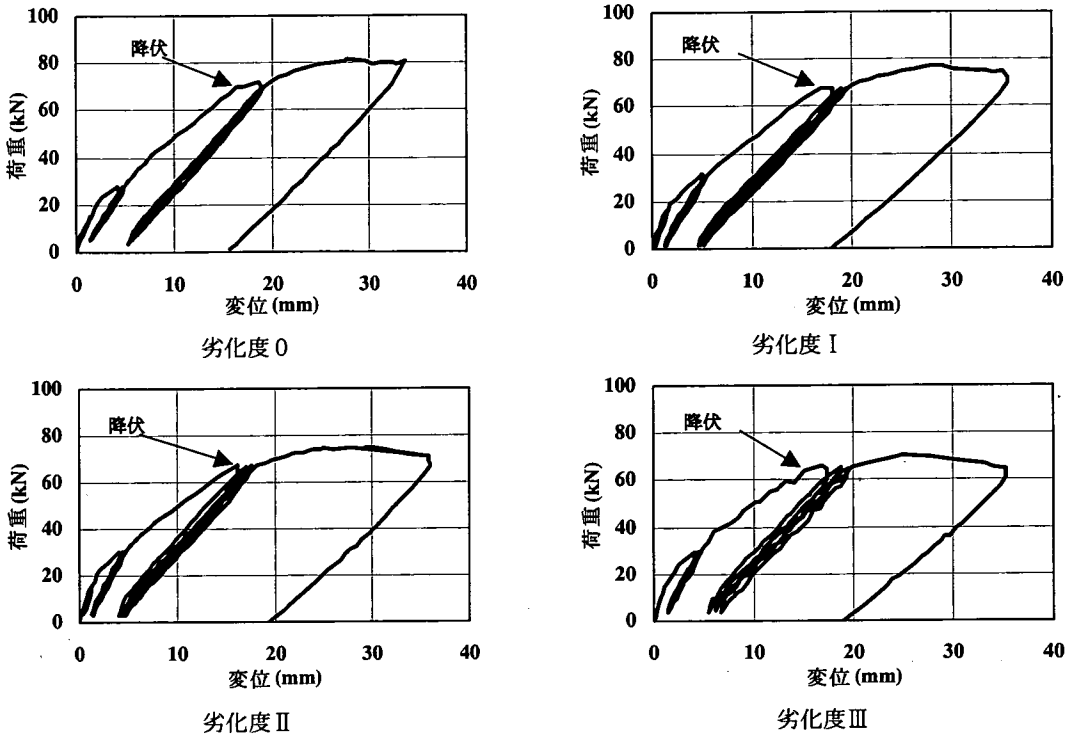


図-8 荷重と載荷点変位の関係

ない。したがって、降伏および終局時の断面毎の荷重分布として評価した場合、鉄筋の腐食状態によっては、接合面が部材の耐力を決定する支配的断面とは一致しないことになる。今回の試験においても、図-7b)のように腐食による断面欠損率の影響を受けて、劣化度Ⅱ、Ⅲの試験体では接合面から50mm上方で計算上、終局状態が決定されていることになる。このような現象は、実際の構造物にも十分考え得ることであり、維持・管理を行う際には、腐食による断面欠損率を鉄筋軸方向に連続的に把握することが重要であると考えられる。

b) 変形性およびひび割れ分散性

図-8に劣化度0～Ⅲ試験体の荷重と載荷点変位の関係を示す。同図より、鉄筋降伏前の荷重と載荷点変位との関係は、鉄筋の腐食度が大きくなって本実験の範囲では、明確な差は認められない結果となった。これは、今回の実験において腐食区間を接合部近傍に限定したことにより、付着劣化区間が短くなっており、その影響が荷重—変位関係に対して明確に現れなかったことによるものと考えられる。しかしながら、腐食による鉄筋とコンクリートとの付着性能の低下を考えると、同一荷重レベルにおける鉄筋のすべり量は大きくなることが予想される。一方、鉄筋降伏以降では、鉄筋の腐食度が大きいほ

ど、荷重増加は小さくなっている。これは、鉄筋の腐食に伴うコンクリートと鉄筋間の付着性能の低下により、鉄筋に生じた引張応力がコンクリートに有効に伝達されず、ひび割れ分散性が低下したために起こった現象であると考えられる。すなわち、ひび割れ分散性の低下により、内部鉄筋が腐食した試験体接合部に変形の局所化が起こり、同一変位レベルにおける圧縮縁コンクリートの負担分が、腐食度の小さい試験体に比べて大きくなったことに起因していると考えられる。

図-9に最大荷重時の柱部材におけるひび割れ幅の分布状況を示す。図より鉄筋が腐食していない劣化度0の場合のひび割れ幅の分布状況は、部材に作用するモーメント勾配に対応して接合部から載荷点へと徐々に減少している。すなわち、コンクリートと鉄筋の相互作用である付着性能が良好に作用していることが分かる。一方、鉄筋の腐食により鉄筋軸方向に縦ひび割れが発生すると、ひび割れ幅の分布形状が劣化度0とは大きく異なり、接合部近傍の1箇所のひび割れ幅のみが卓越して大きくなっている。その傾向は劣化度が大きいほど、言い換えれば鉄筋の腐食が激しいほど顕著である。また、ひび割れ発生状況は、劣化度0の試験体に比べて、劣化度Ⅰ～Ⅲの試験体は部材に発生したひび割れ本数が少なく

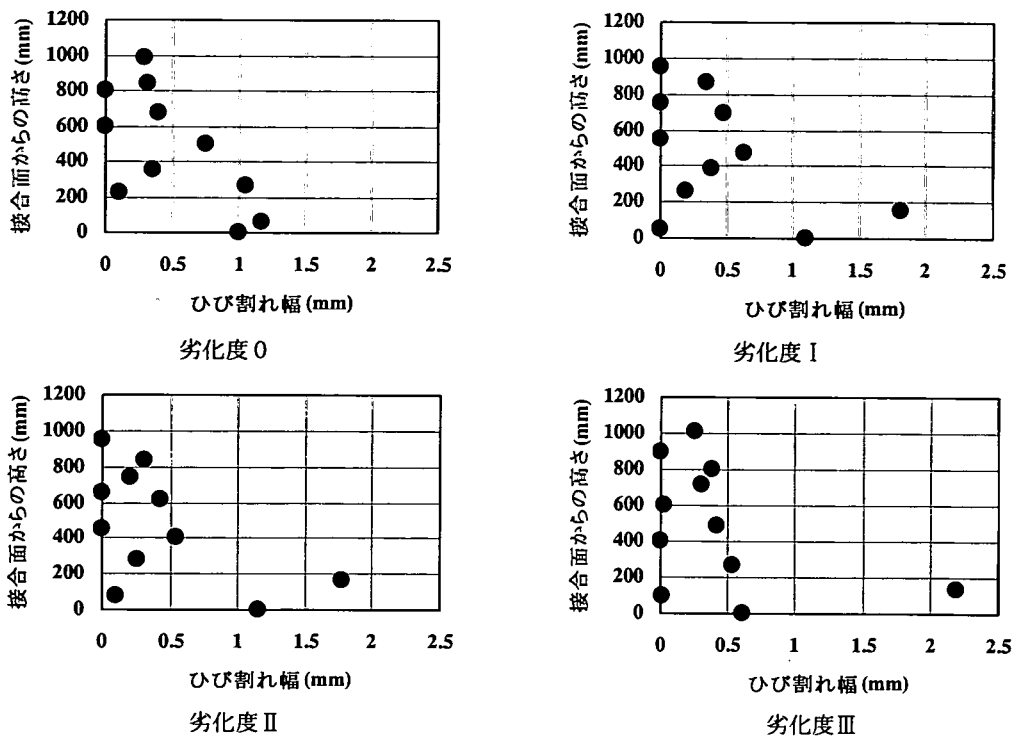


図-9 ひび割れ幅の分布 (最大荷重時)

なった。劣化度 0 の場合には、ひび割れが 9 本発生したのに対して劣化度 III の場合は 6 本となっていた。したがって、このように鉄筋腐食により鉄筋とコンクリート間の付着性能が低下すると、ひび割れの分散性が低下し、特定のひび割れが卓越して開口する。その結果、先に示した理由により、変形が局部的に進行し破壊にいたる現象を引き起こすことになる。また、本実験の範囲では、せん断補強筋の腐食が変形性に与える影響を定量的に評価はできていないが、せん断補強筋の腐食程度によって、主筋に対する拘束効果に変化することが予想される。これは、せん断補強筋の腐食程度の違いにより、主鉄筋とコンクリート間の付着性能に変化を与えることを意味し、テンションスティフニング効果の低下に大きな影響を与えるものと考えられる。今後の検討課題としたい。

(3) 鉄筋の腐食状態が AE 発生特性に与える影響

実構造物における部材損傷度の定量的評価を目的として、内部鉄筋が腐食した T 形試験体の許容応力レベルでの AE 発生特性について検討した。既報告²⁾によると、電食期間が長いほど、すなわち内部鉄筋の腐食が進行するほど検出される AE の発生数が増加する結果が示されている。この原因は、鉄筋

腐食により鉄筋とコンクリート間の付着ひび割れが誘発されたこと、鉄筋の腐食膨張圧により周囲のコンクリートに引張応力が加わったことにより、試験体内部に微小破壊の潜在的な発生源が蓄積されたためとされている。一方、Yoon らの研究⁷⁾によれば、鉄筋の腐食程度が増加するほど、AE 発生数は減少し、コンクリート構造物の損傷レベルを評価する上で重要な特性であることを指摘している。図-10 に許容応力レベルで繰返し载荷を行った際の载荷点変位と AE 発生数の関係を示す。同図より許容応力レベルで繰返し载荷を行った場合の AE 発生数は、劣化度 I の試験体が最も多く、劣化度 0、II、III の順序で減少した。また、劣化度 I の試験体は、縦ひび割れ発生直後のものであり、他の試験体に比べて、繰返し荷重下における AE 発生数がより多く増加している。このように、腐食の進行に伴う AE 発生特性は、本研究で得られた結果と既報告^{2),7)}によって得られた結果とは、異なった傾向を示している。

AE の定義に立ち帰ると、AE は、「固体材料内部の微小な破壊あるいはそれと同様なエネルギー解放過程によって発生する弾性波現象」⁴⁾であり、AE 発生数の多寡はある応力場に曝された時に、部材内部に AE が発生しうる潜在的な発生源がどの程度あるかによって決定されると考えられる。本研究にお

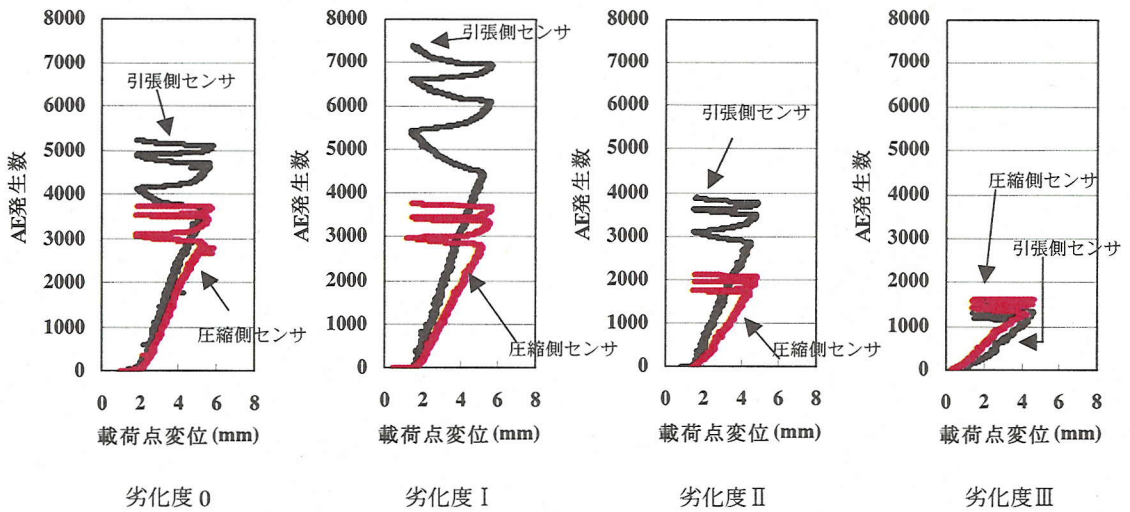


図-10 許容応力レベルでの載荷点変位と AE 発生数の関係

ける許容レベルでの AE 発生数は、腐食していない劣化度 0 の試験体に比べて縦ひび割れ発生直後の劣化度 I の試験体の方が多くなっている。また、繰返し荷重下における AE 発生数も多く、コンクリート内部が非常に不安定な状態になっていることが推察できる。これより、RC 部材が鉄筋腐食により損傷し、ひび割れが発生した直後では、鉄筋とコンクリート界面の微細なひび割れの誘発や腐食膨張圧による鉄筋周囲のコンクリートの引張応力に起因して部材内部に潜在的な発生源が増加したものと考えられる。一方、腐食が更に進行した劣化度 II、III の試験体は劣化度 0 の試験体に対して AE 発生数が減少し、潜在的な AE 発生源が劣化の進行とともに減少したことを示している。これは、Yoon らの試験結果⁷⁾と一致している。すなわち、縦ひび割れ発生直後の状態から、さらに腐食が進行し縦ひび割れが拡大すると、急激に鉄筋とコンクリート間の付着性能が低下することにより、腐食によって損傷した鉄筋近傍のコンクリートに応力が有効に伝達せず、鉄筋とコンクリート界面での AE 発生数が減少したためと考えられる。また、腐食によるコンクリートへの応力伝達の喪失により曲げひび割れの分散性が低下するため、載荷による曲げひび割れの絶対的な本数が減少し AE 発生数が更に減少したと考えられる。このように、鉄筋腐食によって損傷した部材は、鉄筋腐食に起因する潜在的な AE 発生源の増加と、ひび割れ分散性の低下による AE 発生源の減少のどちらの要因が卓越するかによって、その AE 発生特性が変化すると考えられる。実構造物への適用に当たっては、計測結果の解釈に注意が必要である。

(4) 電気化学的計測による腐食状態の検討

a) 自然電位

図-11に劣化度 I、II の T 形試験体柱部における自然電位分布の一例を示す。なお、図中に示した電位分布は各試験体の引張 2 (表-3 参照) に対応する鉄筋の直上で測定したものである。また、電位は飽和硫酸銅電極 (CSE) に対する自然電位値に換算してある。同図より、自然電位は接合面から約 150mm の範囲で最も卑な電位を示しており、載荷点に近づくほど、貴側に移行している。この傾向は、載荷試験終了後に測定した図-6 の断面欠損率の分布とほぼ対応したものとなっている。しかしながら、ASTM の自然電位による鉄筋腐食推定規準⁷⁾にしたがうと、測定した範囲がすべて 90% 以上の確率で腐食していることになり、実際の腐食状況とは一致しない。これは、電食時に陽極として作用した鉄筋に向かい、塩化物イオンが電気泳動することにより、鉄筋位置まで多量の塩化物イオンが存在すると考えられること、および電食期間中の海水散布により、コンクリートの含水状態がほぼ飽和していることにより、より卑な自然電位を呈したものと考えられる。このように自然電位の絶対値だけでは腐食範囲を適切に判定することはできず、電位分布の形状も考慮して慎重に判定する必要がある⁹⁾。本実験でも見られるように、自然電位の測定値は、コンクリートの含水量およびコンクリート中に含まれる塩分濃度の影響を大きく受けるため、港湾コンクリート構造物の場合には、特に自然電位の測定値と塩分濃度との関係に注意を払うべきと考えられる¹⁰⁾。

分極抵抗は、鉄筋の腐食速度に関する情報を与え、

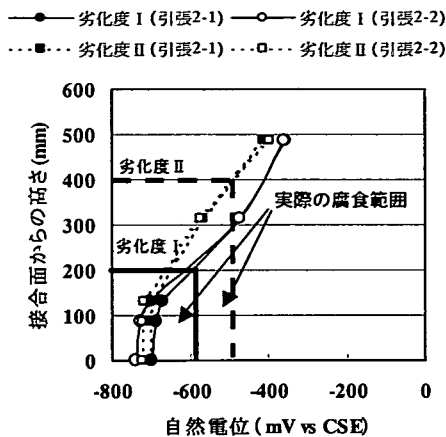


図-11 自然電位の分布

理論的には分極抵抗の逆数の時間積分値と腐食量との間には線形関係が存在する。したがって、この関係を用いることにより、分極抵抗の逆数の時間積分値を鉄筋の断面欠損率に換算でき、非破壊的な情報により構造性能を検討できることになる。ここで、電食期間中に経時的に測定して得られた分極抵抗を用いて、実際の断面欠損率との関係を検討した。図-12に分極抵抗の逆数の時間積分値と断面欠損率との関係を示す。同図より分極抵抗の逆数の時間積分値と断面欠損率との関係は、相関係数で0.81という良好な線形的相関関係を示している。本研究において分極抵抗の測定は1週間ピッチで行っており、測定間隔をより密にすることにより腐食量の推定精度をさらに向上させることができると考えられる。しかしながら、実構造物への電気化学的計測の適用を考えると、試験室レベルで適用するような間隔で分極抵抗を測定することは難しい。実際の腐食量を適切にかつ安全側に評価できる、分極抵抗の時間履歴モデルを今後検討する必要がある。

4. 鉄筋腐食がRC部材の構造性能に及ぼす影響の解析的評価に関する検討

RC部材接合部の内部鉄筋の腐食が、部材の構造性能に与える影響を解析的に評価するため、鉄筋とコンクリート間の付着劣化を考慮し、非線形有限要素解析を行った。解析概要と結果を以下に示す。

(1) 解析モデル

コンクリートは、4節点アイソパラメトリック平面応力要素とし、鉄筋はトラス要素とした。要素サ

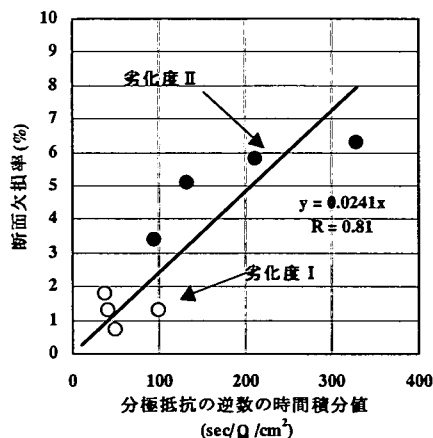


図-12 分極抵抗の逆数の時間積分値と断面欠損率との関係

イズはすべて50mmとした。腐食に伴う鉄筋とコンクリート間の付着性能の低下を評価するため、T形試験体柱部主筋に関しては、ボンド要素を設定した。その他の鉄筋とコンクリートは完全付着とした。コンクリートの非線形構成則は、コンクリート圧縮破壊までの挙動としてKupfer則¹¹⁾を、圧縮破壊以降の応力-ひずみ関係は、図-13に示すような軟化挙動を示すとし、八面体せん断応力と八面体せん断ひずみの関係を式(2)で与えている。

$$\tau_i = \tau_f - \alpha \cdot G_0 \cdot (\gamma_i - \gamma_f) \quad (2)$$

なお、本解析では $\alpha = 0.07$ と $\beta = 0.2$ とした。圧縮破壊の発生規準は大沼らの式¹²⁾にしたがった。ひび割れの発生規準は最大主応力判定により行い、ひび割れ発生後の応力-ひずみ関係は、図-14に示すように、ひび割れ発生以降の応力残留量をひび割れひずみの関数とし、式(3)に示す応力軟化曲線を定義した。

$$\sigma_n = \exp \left[\frac{\log(\alpha_n)}{\epsilon_f} \cdot (\epsilon_i - \epsilon_{cr}) \right] \cdot f_t \quad (3)$$

ここで、 ϵ_{cr} : ひび割れ発生時のひずみ

ϵ_i : ひび割れひずみ

ϵ_f : 基準ひずみ (2000 μ)

f_t : ひび割れ発生応力

α_n : 基準ひずみ2000 μ の時5%

また、鉄筋は弾塑性材とし、降伏応力に達した後のひずみ硬化率を初期剛性の1%とした。降伏条件

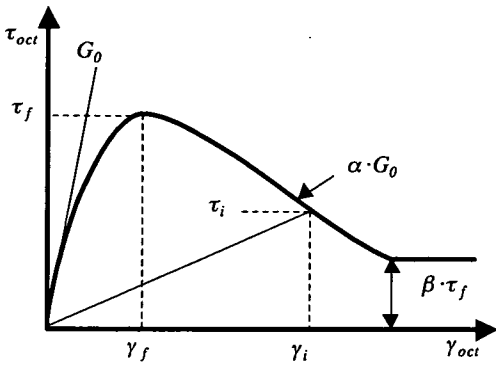


図-13 圧縮破壊後の応力ひずみ-関係

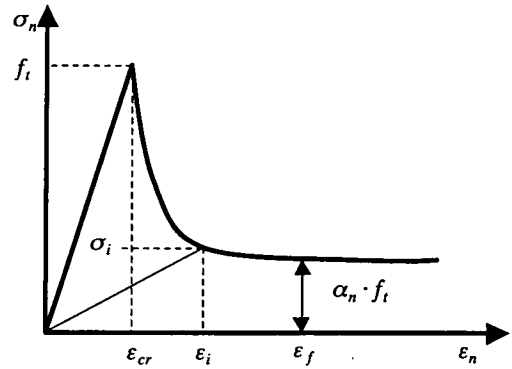


図-14 応力軟化曲線

は一般的な von-Mises の降伏条件を設定した。

(2) 鉄筋とコンクリート間の付着特性

鉄筋とコンクリートの付着特性を表現するボンド要素のせん断応力とせん断ひずみの関係は、図-15 に示すバイリニア型とし、鉄筋の拔出量を表現した。ボンド要素高さを h 、鉄筋の拔出量を S とすればせん断ひずみ γ は式(4)として評価でき、せん断ひずみとせん断応力との関係は式(5)として評価できる。すなわち、内部鉄筋が腐食しコンクリートに縦ひび割れが発生したことによる付着性能の低下は、劣化度0のせん断弾性係数 G_s を腐食の程度によって低減させることで評価することとした。なお、せん断強度は、主鉄筋がせん断補強筋により拘束されている場合には、腐食ひび割れが生じてもその付着強度はあまり低下しないとの既往の知見^{13),14)}を参考にして、本解析では劣化度0のせん断強度で一定として解析した。また、ボンド要素の奥行きは鉄筋周長、ボンド要素高さは0.1mmに設定した。

$$\gamma = \frac{S}{h} \quad (4)$$

$$\tau = G_s \cdot \gamma \quad (5)$$

(3) 解析の流れ

解析対象は、2.(2)で示した劣化度0の健全試験体と劣化度Ⅲの試験体とした。本解析ではボンド要素内のせん断応力とせん断ひずみの関係が、腐食を評価する上での最も重要な要素と考えられる。そこで、劣化度0のT形試験体を対象にボンド要素内のせん断応力とせん断ひずみの関係に対してパラメータ解析を行い、解析上の荷重-載荷点変位関係とひび割れ発生状況が実験結果と適合するように基本となるボンド要素のせん断応力とせん断ひずみの関係を決

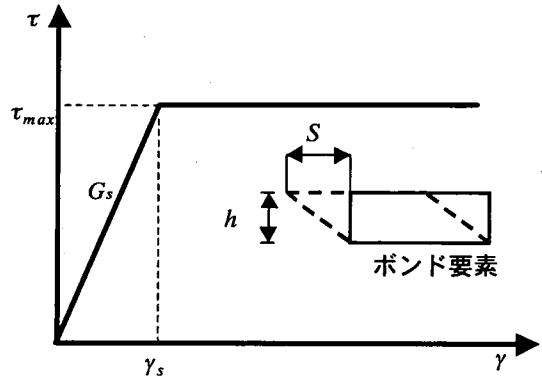


図-15 ボンド要素のせん断ひずみとせん断応力の関係

表-5 解析パラメーター一覧

劣化度	解析ケース	せん断弾性係数 G_s (N/mm ²)	せん断強度 τ_{max} (N/mm ²)
0	1	6	5
Ⅲ	2	6	5
	3	3	5
	4	2	5
	5	1	5

定した。劣化度Ⅲの試験体は、表-3に示す劣化度Ⅲの断面欠損率をトラス要素に反映させ、内部鉄筋の腐食区間に対応するボンド要素のせん断弾性係数 G_s を表-5に示すように低減し解析した。荷重は載荷点位置における集中荷重とし、強制変位を与えた。

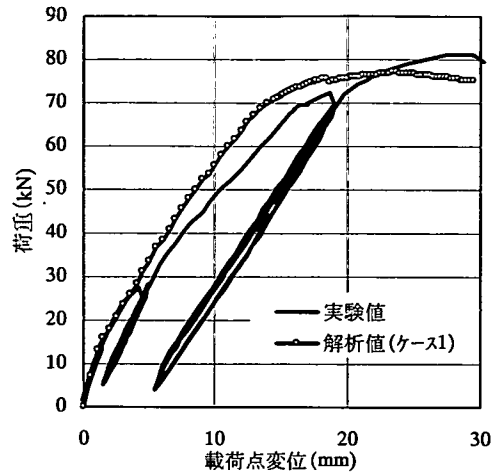
(4) 実験値と解析結果の比較

図-16a)に劣化度0の荷重-載荷点変位に関する実験値と解析値の比較を示す。同図より鉄筋が腐食していない劣化度0のケースにおいて、ボンド要素のせん断弾性係数を6N/mm²、せん断強度を5N/mm²として解析すれば、若干実験値に対して部材の剛性が高いものの、劣化度0の試験体の荷重-載荷点変位

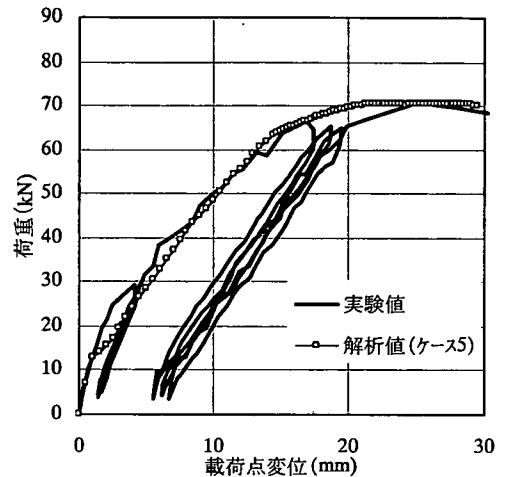
関係をほぼ良好に評価できていると考えられる。この劣化度0のせん断弾性係数とせん断強度を基準として、表-5に示すようにせん断弾性係数を 6N/mm^2 から 1N/mm^2 まで徐々に低減し、かつ腐食による主筋の断面欠損率を考慮すると、解析対象とした劣化度Ⅲの荷重—載荷点変位関係の実験値と解析値が、図-16b)に示すようにせん断弾性係数 1N/mm^2 の時に最も良く一致した。図-17に載荷点変位が 20mm 時の接合部近傍の変形状況を示す。図に示した変位レベルは、最大荷重レベルにほぼ相当している。図によれば同一変位レベルにおいて、腐食の影響を考慮した劣化度Ⅲの解析結果は、劣化度0の解析結果に比べて接合部近傍の変形が顕著になっており、実験により得られた接合部付近の変形の集中・局所化といった現象を十分に表現できた。

図-18に実験および解析によって得られたひび割れ発生状況を示す。図より、劣化度0と劣化度Ⅲの解析結果を比較すると、劣化度Ⅲのひび割れ本数は、劣化度0に比べて減少しており、接合部付近の内部鉄筋の腐食によるひび割れ分散性の低下現象を良く評価できており、ひび割れの発生状況も実験結果と良好に対応した。以上のように、腐食による鉄筋の断面欠損の影響と鉄筋とコンクリート間の付着性能の低下を、鉄筋要素の断面減少およびボンド要素のせん断弾性係数の低下として解析上考慮することによって部材の耐荷性、変形性および鉄筋の付着性能の低下によるひび割れ分散性の低下、変形の局所化といった現象が定量的に評価できる。今回の解析では劣化度0と劣化度Ⅲのせん断弾性係数は、それぞれ 6N/mm^2 および 1N/mm^2 である。劣化度Ⅲの腐食程度から判断すると、平均的な鉄筋の断面欠損率で3~4%の場合、ボンド要素のせん断弾性係数を健全時の約20%に低減して解析することによって、内部鉄筋の腐食が構造性能に与える影響を評価できた。

これまで示したように、内部鉄筋が腐食した場合の耐荷性・変形性を定量的に評価する上で、ボンド要素に用いるせん断応力とせん断ひずみの関係が最も重要な要因となる。今回の解析では、実験結果を基にしてパラメータスタディを実施し、実験値に適合するように、その関係を定義した。実際の構造物への適用を考えた場合には、劣化した構造物の調査結果、例えば、ひび割れ幅などの目視観察結果や非破壊試験による腐食に関する情報をもとにボンド要素の特性を腐食状態に応じて的確に評価する必要がある。今後、数多くの実験結果をもとに解析を重ね、腐食量ないしは表面ひび割れ幅とせん断弾性係数の低下の関係を定量化する必要があると考えられる。

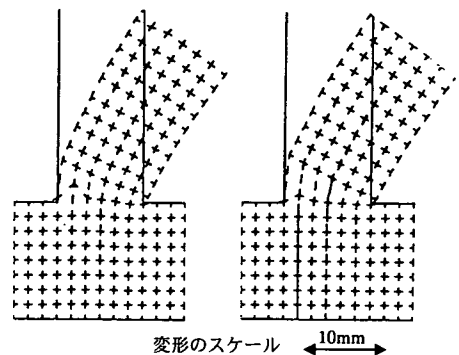


a)劣化度0試験体



b)劣化度Ⅲ試験体

図-16 荷重—変位関係



劣化度0 劣化度Ⅲ
図-17 接合部近傍の変形状況(解析)

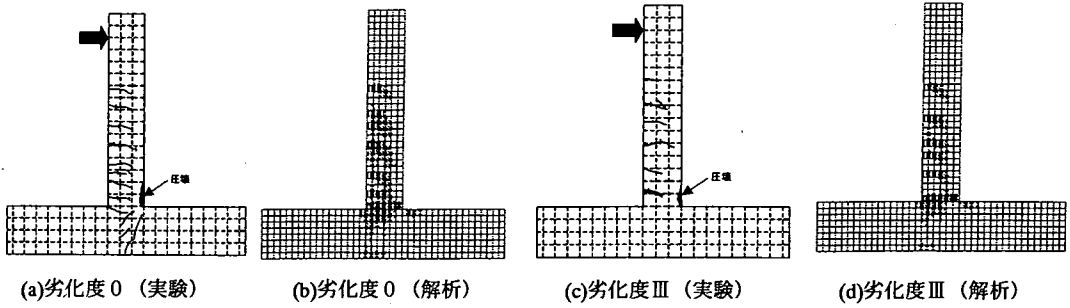


図-18 ひび割れ発生状況

5. 結論

本研究では、RC部材の接合部を模擬したT形試験体により、部材接合部の劣化度を電食により調整し、荷重試験を行うことで、内部鉄筋の腐食状態が耐荷性・変形性などの構造性能に与える影響について検討した。また、実験データを基に鉄筋の断面欠損率と鉄筋とコンクリート間の付着性能の低下を考慮して、非線形有限要素解析を行い、内部鉄筋の腐食による構造性能の低下を定量的に検討した。さらに部材損傷度を非破壊試験により評価することを目的として、AE計測および電気化学的計測の適用性について基礎的な検討を行った。本研究で得られた結果は以下に示すとおりである。

- (1) 劣化の進行、すなわち腐食による鉄筋の断面欠損率の増加に伴い鉄筋降伏荷重および最大荷重が低下し、断面欠損率と耐荷性との間に相関関係が認められた。
- (2) 鉄筋腐食の位置と程度によって、設計時に想定していた断面で耐力が決定されないことが十分に考えられる。維持・管理を行う際には腐食による断面欠損率を鉄筋軸方向に連続的に評価できることが望ましい。
- (3) 部材接合部において内部鉄筋が腐食すると、鉄筋とコンクリート間の付着性能の低下によって、コンクリートに鉄筋応力が有効に伝達されず、ひび割れ分散性が低下した。これにより、部材接合部付近に変形が局所的に集中し終局破壊に至った。
- (4) 許容応力レベルにおけるAE発生数は、縦ひび割れが発生した直後の劣化度Ⅰの試験体が最も多く、さらに鉄筋腐食が進行し劣化度が大きくなると、AE発生数は少なくなった。これらの現象は、鉄筋腐食に起因する潜在的なAE発生源の増加と、付着性能の低下やひび割れ分散性の低下によるAE発生源の減少との相互関係に依存する

と考えられる。

- (5) 自然電位の分布は、実際の断面欠損率の分布と概ね対応していたが、自然電位の絶対値だけでは腐食範囲を推定することは困難であった。自然電位の測定値には、コンクリート中の塩分濃度と含水率の影響が非常に大きく、実構造物への適用を念頭に測定値に与える環境条件の影響を明確にする必要があると思われる。また、分極抵抗の逆数の時間積分値と断面欠損率との間に高い相関関係があり、鉄筋の断面欠損率を非破壊的に評価できる可能性を示すことができた。
- (6) 腐食による鉄筋の断面欠損の影響と鉄筋とコンクリート間の付着性能の低下を、鉄筋要素の断面減少およびボンド要素のせん断弾性係数の低下として解析上考慮することによって、部材の耐荷性、変形性および鉄筋の付着性能の低下によるひび割れ分散性の低下、変形の局所化といった現象を解析的に精度良く評価できた。

6. あとがき

本研究によりRC部材接合部の内部鉄筋が腐食した場合の構造性能に与える影響と部材損傷度を評価するためのAE計測および電気化学的計測に対する基礎的データを得ることができた。しかしながら、腐食による構造性能の変化を合理的かつ定量的に評価できたとは言えない。今後、非破壊試験のみならず、目視観察から得られる縦ひび割れ幅やひび割れ長さ等の情報も含め構造物の損傷状態を定量的に評価できる方法、および、せん断補強筋に拘束された状態での主鉄筋の付着性能の変化などを検討し、この影響を的確に反映できる評価手法が必要になると考えられる。

参考文献

- 1) 古玉梧, 田邊俊郎, 横田弘, 濱田秀則, 岩波光保, 日比智也: 棧橋の維持補修マネジメントシステムの開発, 港湾技研資料, No.1001, 2001.
- 2) 岩波光保, 横田弘, 秋本孝: 内部鉄筋が腐食したRCはりの力学性能評価のための非破壊調査手法の適用性, 港湾技研資料, No.978, 2000.
- 3) 運輸省港湾技術研究所 編著: 港湾構造物の維持・補修マニュアル, 沿岸開発技術ライブラリー No.6, 沿岸開発技術研究センター, pp.95-97, 1999.
- 4) 大津政康: アコースティック・エミッションの特性と理論, 森北出版, 1993.
- 5) 横田優: 鉄筋腐食診断機の開発, 電力土木, No.257, pp.64-71, 1995.
- 6) 日本コンクリート工学協会: コンクリート構造物のリハビリテーション研究委員会報告書, pp.43-46, 1998.
- 7) Yoon, D.J., Weiss, W.J. and Shah, S.P.: Assessing damage in corroded reinforced concrete using acoustic emission, J. EM, ASCE, Vol.26, NO.3, pp.273-283, 2000.
- 8) ASTM: Half Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steels in Concrete, ASTM C876-77, 1977.
- 9) 武若耕司, 小林一輔: 海洋環境下における鉄筋の腐食性状と自然電位分布の関係, 第5回コンクリート工学年次講演会講演論文集, pp.53-56, 1983.
- 10) 土木学会 腐食防食委員会: 鉄筋腐食・防食および補修に関する研究の現状と今後の動向, コンクリート技術シリーズ No.26, 土木学会, 1997.
- 11) Kupfer, H.B. and Gerstle, K.H.: Behavior of concrete under biaxial stress, Proc. of ASCE, EM4, pp.853-866, 1973.
- 12) 大沼博志, 青柳征夫: 二軸応力下のコンクリート強度・変形状に関する実験的研究, 電力中央研究所報告, No.375016, 1976.
- 13) 橘吉宏, 梶山康男, 川村満紀: 鉄筋腐食によって損傷を受けた RC ばりの挙動に関する研究, 土木学会論文集, 第402号/V-10, pp.105-114, 1989.
- 14) 李翰承, 友澤史紀, 野口貴文: 鉄筋腐食が鉄筋とコンクリートとの付着性状に及ぼす影響, セメント・コンクリート論文集, No.50, pp.534-539, 1996.

(2002.3.14 受付)

STRUCTURAL PERFORMANCE OF REINFORCED CONCRETE BEAM-TO-COLUMN JOINT WITH CORRODED REBARS

Fuminori SATOH, Mitsuyasu IWANAMI and Hiroshi YOKOTA

This paper presents the experimental results on T-shaped reinforced concrete beam-to-column joint with corroded rebars. Rebars at the joint were subjected to accelerated corrosion by means of the electrolytic technique. The degree of corrosion was monitored by electrochemical methods. Then flexural and shear loads were repeatedly applied to the joint. Decrease in load-carrying capacity due to corrosion was evaluated by taking into account the cross-sectional loss of rebar and degradation of bond performance between rebars and concrete at the joint. It was clarified that local horizontal displacement of the column was affected by deterioration of bond performance.