

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE
OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No.1006

September 2001

R C 部材接合部の構造性能に及ぼす内部鉄筋腐食の影響

佐藤 文則
岩波 光保
横田 弘

独立行政法人 港湾空港技術研究所

Independent Administrative Institution,
Port and Airport Research Institute, Japan



目 次

要 旨	3
1. まえがき	4
2. 実験概要	4
2.1 試験体概要	4
2.2 載荷試験	6
2.3 腐食状態の評価	7
3. 内部鉄筋の腐食状況	8
4. 内部鉄筋の腐食と力学的性能との関係	9
4.1 耐荷性	9
4.2 変形性	11
4.3 ひび割れ分散性	12
5. 鉄筋の腐食がA E発生特性に与える影響	13
6. 電気化学的手法による腐食状態の検討	15
6.1 自然電位	15
6.2 分極抵抗	15
7. 結論	16
8. あとがき	16
参考文献	17

Evaluation of Structural Performance of Reinforced Concrete Beam-to-Column Joint Subject to Rebar Corrosion

Fuminori SATO*
Mitsuyasu IWANAMI**
Hiroshi YOKOTA***

Synopsis

Port and harbor concrete structures suffer from the attack of chloride ion that may cause degradation of materials. As a result, expansion of rebars due to corrosion may induce cracks in concrete cover and consequent fall of cover concrete. Therefore, it is essential to keep port and harbor concrete structures in good condition during their service period by means of regular maintenance and repair or strengthening when required. The execution timing and methods of measures against chloride-induced deterioration should be well examined with the extent of damages. For this purpose, it is necessary to evaluate the remaining structural performances such as load-carrying capacity and ductility.

From these points of view, the study on the relationship between the degree of rebar corrosion and the basic mechanical behaviors of deteriorated concrete members has been undertaken experimentally by loading tests. As a part of the study, this paper presents the experimental results and discussion on T-shaped reinforced beam-to-column joint structures subject to rebar corrosion. At first rebars in the joint part was artificially and rapidly corroded by means of the electrolytic technique. The degree of corrosion was monitored by electrochemical methods. Then flexural and shear loads were applied at the joint. It was concluded that the decrement in load-carrying capacity due to corrosion was evaluated by taking into account of the reduced cross section of rebar. It was also made clear that local transverse displacement of the member was affected by deterioration of bond performance between rebars and concrete at the joint.

Key Words: reinforced concrete beam-to-column joint, remaining structural Performance, rebar corrosion, local deflection, acoustic emission, half cell potential, polarization resistance

*Trainee of Structural Mechanics Division, Geotechnical and Structural Engineering Department
** Research Engineer of Structural Mechanics Division, Geotechnical and Structural Engineering Department Division
*** Chief of Structural Mechanics Division, Geotechnical and Structural Engineering Department
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan
Phone : +81-468-445059 Fax : +81-468-440255 e-mail:iwanami@phri.go.jp

RC部材接合部の構造性能に及ぼす内部鉄筋腐食の影響

佐藤 文則 *
岩波 光保 **
横田 弘 ***

要 旨

海洋環境に隣接するコンクリート構造物は、劣化因子である塩化物イオンの影響を絶えず受けている。その結果、内部鉄筋が腐食し、腐食生成物の膨張圧によりかぶりコンクリートにひび割れが発生し、さらに劣化が著しい場合にはかぶりの剥落に至るいわゆる塩害を引き起こす。したがって、供用期間中に港湾コンクリート構造物の維持・管理を行い、必要に応じて適切な補修・補強対策を講じることが重要となる。一概に補修・補強を講じるといっても、対策の時期や方法は劣化の程度により異なると考えられる。したがって、補修・補強対策を講じるには、塩害により構造物が劣化した場合に、その時点の耐荷性や変形性等の力学的性能を定量的に評価することが必要となる。このような背景から、これまではり試験体を用いて内部鉄筋の腐食度とRC部材の力学的性能との関係を検討し、鉄筋の腐食による断面欠損率との関係で概ね評価できることを示した。本研究では、これに加え、部材の応力状態が厳しい柱・はり接合部に着目し、内部鉄筋が腐食した場合の力学的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。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手法を適用し、接合部内部の劣化情報を検討することとした。その結果、耐荷力は鉄筋の断面欠損率で整理でき、変形は腐食に伴う付着性能の低下により局所化することが確認できた。

キーワード：RC部材接合部，力学的性能，鉄筋腐食，局所化，アコースティック・エミッション，自然電位，分極抵抗

* 地盤・構造部構造強度研究室受託研修生
** 地盤・構造部構造強度研究室
*** 地盤・構造部構造強度研究室長
〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 独立行政法人港湾空港技術研究所
電話：0468-44-5059 Fax：0468-44-0255 e-mail:iwanami@phri.go.jp

1. まえがき

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。ここでは、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、構造物が本来保有している初期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素材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、鉄筋コンクリート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を誘発し、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。これまでの塩害により劣化した実構造物の事例より判断すると、劣化の進行速度は他の劣化現象と比較しても極めて速いと考えられ、日常の維持・管理が重要である。また、必要に応じて適切な補修・補強対策を講じることになる。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考え方も含め最も効果的な補修・補強の時期および方法を選定する必要がある。しかし、これまでの、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定性的に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が保有している性能（残存性能）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（古玉ら、2001）。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繋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、これまでには試験体を用いて電食期間を変化させることにより内部鉄筋の腐食度を変化させ、定量的な劣化度判定への非破壊試験の適用性と力学的性能への影響について

検討している。既報告（岩波ら、2000）によれば、非破壊試験のひとつである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認められおり、損傷状態の定量化の可能性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。

本研究では、はり試験体から得られた知見をもとに、通常構造物として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た。鉄筋の腐食状態が部材の耐荷性、変形性等の力学的性能に与える影響を検討し、塩害を受けた鉄筋コンクリート構造物の性能を評価するための基礎的資料を得ることを目的とした。また、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手法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力学的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手法を適用した。図-1に実験フローを示す。

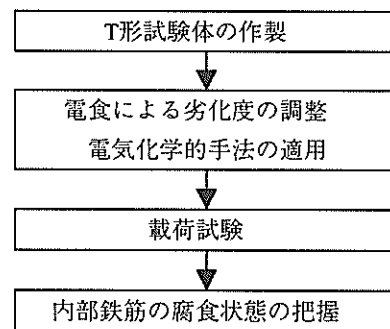


図-1 実験フロー

2.1 試験体概要

(1)試験体諸元

実験に用いた試験体は、RC部材接合部を模擬した高さ2000mm、長さ2000mmのT形状を有するものであり、断面は、300×300mmの矩形となっている。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、鉄筋径D19（SD345）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。主筋のかぶりは50mmであり、接合面より175mmピッチでD6 (SD345) を用いて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を使用した。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、各々31.2N/mm²、 2.65×10^4 N/mm²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、主鉄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当たり0.85mA/cm²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

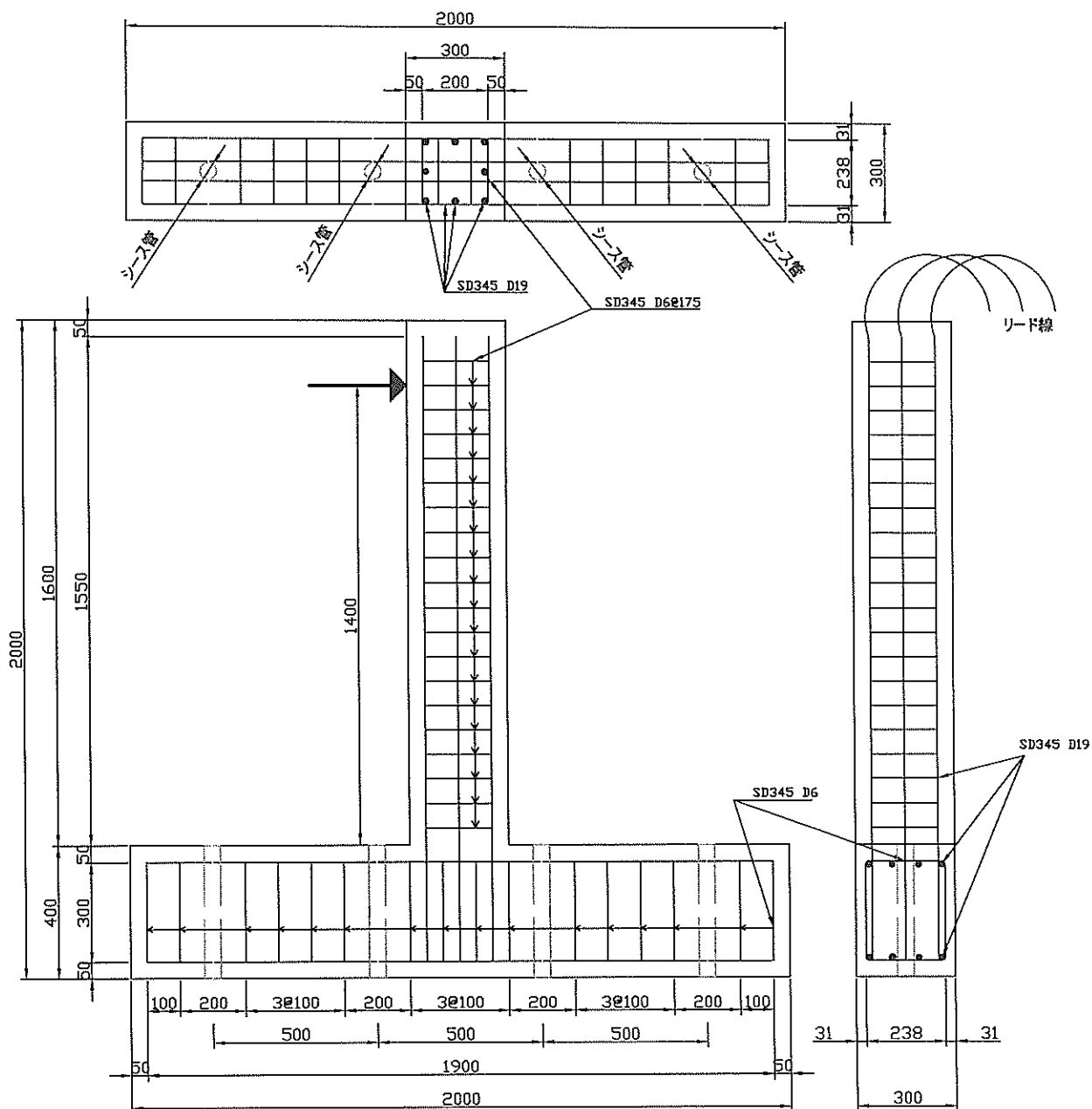


図-2 T形試験体の形状・寸法および配筋

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)				
水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	水	セメント	細骨材	粗骨材	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/cm ³						
細骨材 : 千葉県君津産 表乾密度 : 2.59g/cm ³ 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/cm ³ 吸水率 : 0.27% 粗粒率 : 6.70 実積率 : 61.3%						

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の本数、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」に示される劣化度判定の標準（運輸省港湾技術研究所、

表-3 劣化度判定の標準（「港湾構造物の維持・補修マニュアル」より）

劣化度項目	0	I	II	III	IV	V
鉄筋の腐食	なし	コンクリート表面に点錆がみられる	一部に錆汁がみられる	錆汁多し	浮きさび多し	浮きさび著しい
ひび割れ	なし	一部にひび割れがみられる	ひび割れやや多し	ひび割れ多し（ひび割れ幅数 mm 以上のひび割れ含む）	ひび割れ幅数 mm 以上のひび割れ多数	
かぶりコンクリートの剥離・剥落	なし	なし	一部に浮きがみられる	一部に剥離・剥落がみられる	剥離・剥落多し	剥離・剥落が著しい
点検による調査要否の判定	調査の必要なし（点検継続）		必要に応じて調査		要補修	

直流電流の印加
電流密度 : 0.85mA/cm²

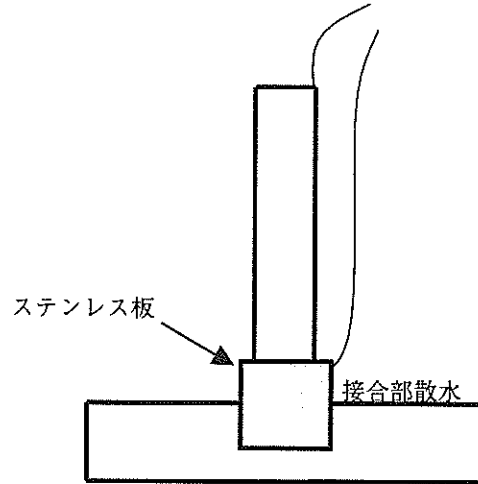


図-3 電食方法

1999) に従い、力学的性能の比較基準である健全な試験体を含めて、劣化度 0, I, II, III の 4 水準とした。表-3 に劣化度判定の標準を示す。

2.2 荷重試験

RC部材接合部の鉄筋腐食を模擬したT形試験体の力学的性能を把握するため、曲げ・せん断応力場で荷重試験を実施した。荷重試験時には、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査した。

(1) 荷重方法および測定項目

図-4にT形試験体の荷重装置および測定位置を示す。荷重は、T形試験体を反力床にPC鋼棒により緊張することにより固定し、反力壁に取り付けたジャッキにより行った。

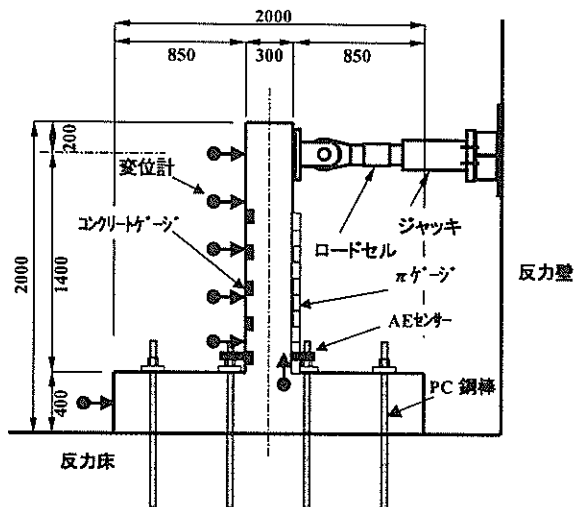


図-4 載荷装置

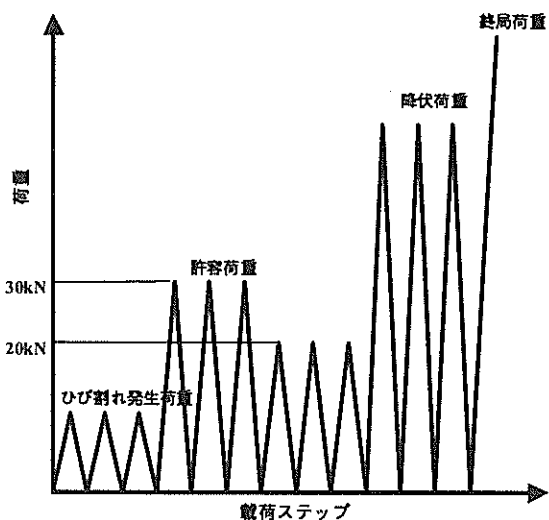


図-5 載荷スケジュール

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、許容荷重(30kN)、20kN、鉄筋降伏荷重の各荷重レベルで載荷および除荷を3回繰り返し、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量で判定した。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データとしての信頼性がないことによる。測定項目は、載荷荷重、柱の水平変位、接合面

での抜け出し量、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。

(2)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(アコースティック・エミッション)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」(大津, 1988)と定義されるものである。AE計測を用いて構造物の損傷度を評価しようとする試みは、そのほとんどが材料および部材の破壊荷重近くまで載荷を行い、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(岩波ら, 2000)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、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している。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、上記知見をもとに載荷試験時にAE計測を行った。図-4に示すように、接合面より10cm上方の引張縁、圧縮縁それぞれにAEセンサーを貼付して、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共振型のものである。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ーに記録された。AE検出のしきい値は50dBとした。

2.3 腐食状態の評価

(1)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、T形試験体の載荷試験終了後に、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。腐食生成物の除錆は、1次処理として主鉄筋にサンドブラスト処理を施し、鉄筋に付着している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錆した。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10cm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10cm毎の平均的な値となっている。

(2)電気化学的手法による腐食状態の推定

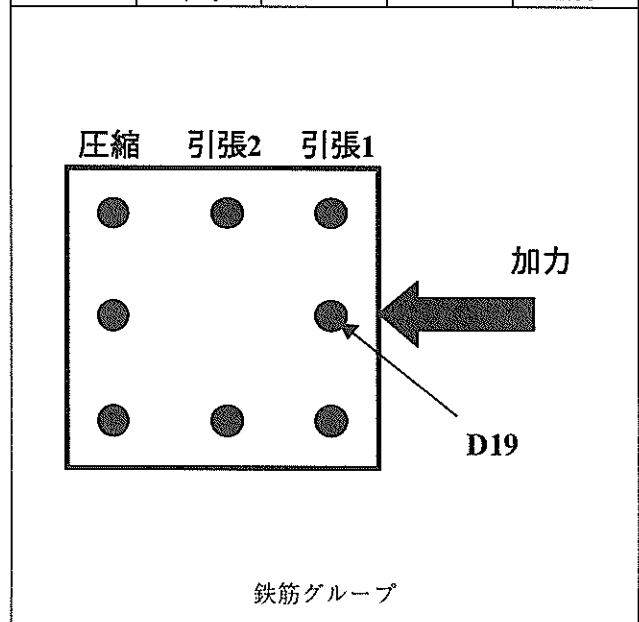
塩害により劣化した構造物の構造性能を定量的に評価する上で、コンクリート内部の鉄筋の腐食状態を腐食量や腐食範囲等の物理量として把握することは非常に重要である。現状では、既存構造物の維持・管理においては、表-3に示す劣化度判定の標準をもとに、目視観察で得られるコンクリート表面からの情報により定性的に鉄筋の腐食状態を推定しているに過ぎない。したがって、内部鉄筋の腐食状態を非破壊試験により、定量的に把握できることが精度良い点検・調査の点で望ましい。内部鉄筋の腐食状態を非破壊的に推定する方法として、電気化学的手法が挙げられる。電気化学的手法の適用により自然電位や分極抵抗などが計測され、鉄筋の腐食状態を推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単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(土木学会, 1997)。すなわち、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手法を適用して、自然電位および分極抵抗の測定を行った。自然電位の測定は、飽和塩化銀電極を用いた。分極抵抗は、交流インピーダンス法に基づき高低2周波数による測定を行った。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ーを用いた(横田, 1995)。また、測定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率をほぼ一定とした。測定対象は、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ーを設置し、定点で経時的に測定を行った。

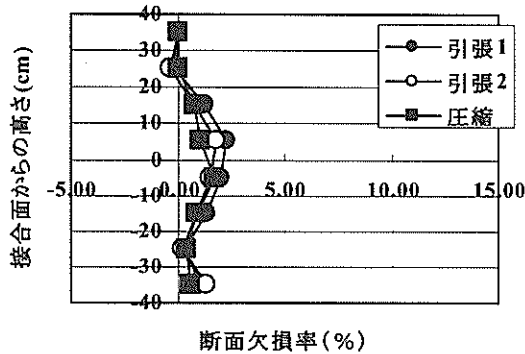
3. 内部鉄筋の腐食状況

表-4および図-6に電食を施した各T形試験体の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つの鉄筋群として求め、それぞれ各接合面からの高さにおける断面欠損率の平均値として整理した。断面欠損率の分布形状は、接合面から20cmの範囲でその最大値が存在し、引

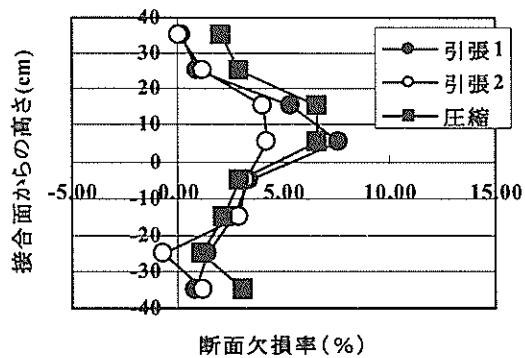
表-4 電食による断面欠損率

劣化度	接合面からの高さ (cm)	引張1(%)	引張2(%)	圧縮(%)
I	25~35	0.00	0.00	0.00
	15~25	0.00	0.00	0.00
	5~15	1.22	0.83	0.80
	0~5	2.31	1.80	1.07
	-5~0	2.00	1.55	1.70
	-15~-5	1.33	0.93	0.87
	-25~-15	0.33	0.19	0.46
	-35~-25	1.06	1.32	0.59
	平均	1.03	0.83	0.69
II	25~35	0.23	0.07	2.09
	15~25	0.94	1.22	2.93
	5~15	5.35	4.06	6.65
	0~5	7.65	4.25	6.58
	-5~0	3.44	3.23	2.91
	-15~-5	2.65	2.90	2.14
	-25~-15	1.40	0	1.15
	-35~-25	0.83	1.18	3.07
	平均	2.81	2.04	3.44
III	25~35	0.34	0.00	0.00
	15~25	2.44	1.24	1.14
	5~15	8.05	5.69	8.45
	0~5	7.28	6.77	7.13
	-5~0	3.50	2.70	1.98
	-15~-5	4.56	2.58	1.16
	-25~-15	2.51	1.54	0.96
	-35~-25	1.23	1.60	0.00
	平均	3.74	2.76	2.60

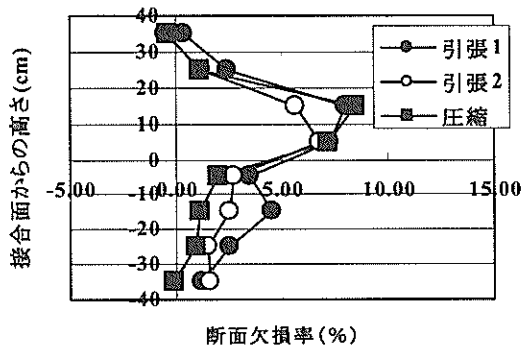




a)劣化度 I



b)劣化度 II



c)劣化度 III

図-6 断面欠損率の分布

張主鉄筋の断面欠損率の最大値も劣化度が進行するにつれて大きくなっている。本実験の目的としている接合部の局所的な鉄筋の腐食促進を生じさせるには、今回の電食による方法は適当であると言える。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、事前載荷による初期ひび割れの無いシリーズの縦ひび割れ発生限界（岩波ら，2000）と概ね一致している。

4. 内部鉄筋の腐食と力学的性能との関係

接合部の劣化度が異なるT形試験体を用いて載荷試験を行い、内部鉄筋の腐食が力学的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。

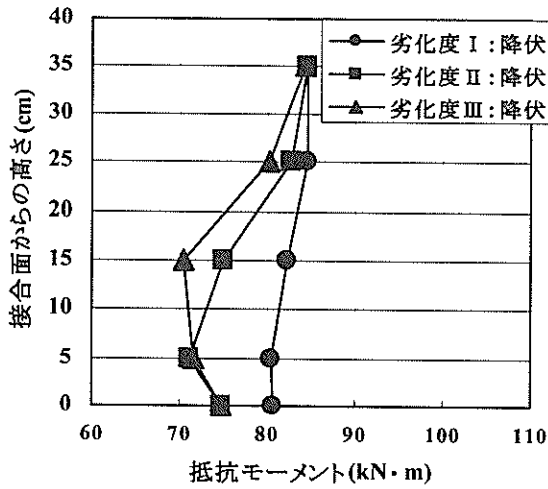
4.1 耐荷性

表-5に劣化度の相違が鉄筋降伏荷重および終局荷重に与える影響を示す。なお、同表中の降伏荷重および終局荷重の値は、鉄筋が腐食していない劣化度0の状態を基準値100%とした残存率で示している。これより劣化度の進行すなわち鉄筋の断面欠損率の増加に伴い、鉄筋降伏荷重および終局荷重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、終局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。この現象は、電食により梁を劣化させた過去の実験結果（岩波ら，2000）とも一致している。

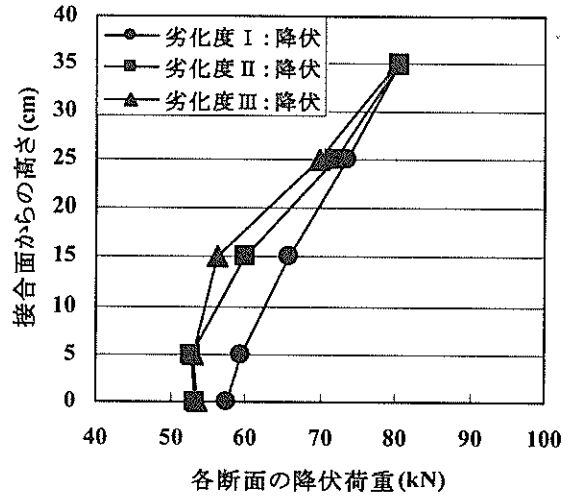
表-5 劣化度の相違が耐荷性に与える影響

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	
終局荷重の残存率 (%)	100	94.6	92.2	87.1	

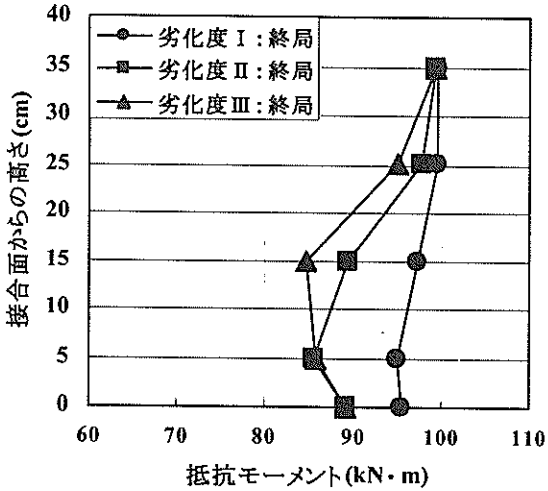
ここで、鉄筋腐食の影響を定量評価するためには、鉄筋の断面欠損率と鉄筋降伏荷重あるいは終局荷重の変化とを関連づける必要がある。そこで、接合面からの高さに応じて断面欠損率を考慮し、各断面での降伏および終局時の抵抗モーメントを算定し、鉄筋降伏荷重および終局荷重を計算した。なお、各断面の抵抗モーメントを算



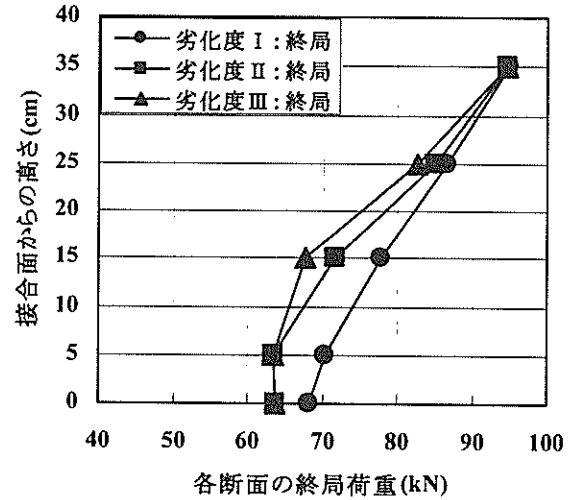
a)各断面の降伏抵抗モーメント分布



b)各断面の降伏荷重分布



c)各断面の終局抵抗モーメント分布



d)各断面の終局荷重分布

図-7 鉄筋の腐食が抵抗モーメントおよび降伏・終局荷重に及ぼす影響

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も考慮した。応力集中の影響は、リハビリテーション研究委員会報告書（日本コンクリート工学協会，1998）を参考にして、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。

$$f_{y,corr} = (1.00 - 1.32dw) \cdot f_y \quad (1)$$

ここに、 $f_{y,corr}$ 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、 dw は鉄筋の断面欠損率である。図-7に鉄筋の腐食が抵抗モーメントおよび降伏・終局荷重に及ぼす影響を示す。同図より各断面での抵抗モーメントは、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。今回の載荷条件における曲げモーメント分布は、接合面でも最も大きくなり、鉄

筋が腐食していない健全な場合では、部材接合面の断面性能で降伏および終局荷重が決定されることになる。しかしながら、各断面での抵抗モーメントの分布から分かるように、部材軸方向に対して抵抗モーメントは一律ではない。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表現した場合、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、その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5cm上方で計算上、降伏・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。

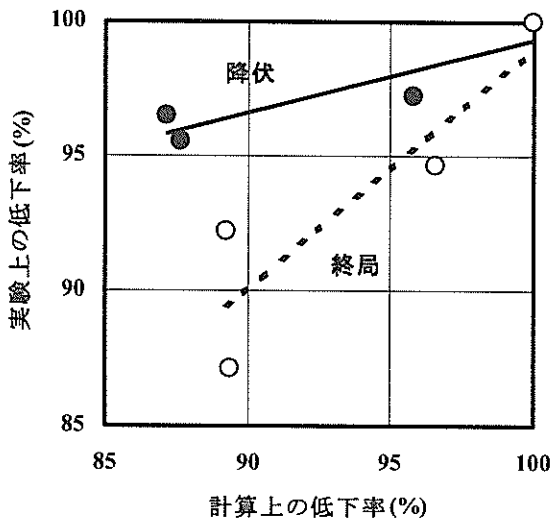


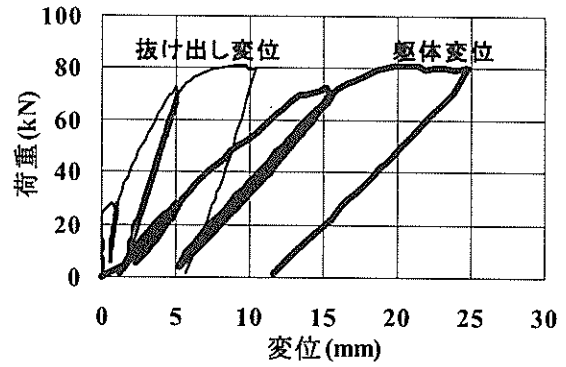
図-8 計算値と実験値の比較

図-8に劣化度0の試験体の降伏および終局荷重に対する計算上の低下率と実験上の低下率との関係を示す。同図より、腐食に伴う終局荷重の計算上の低下率は、実験から得られた低下率と概ね一致しているといえる。しかしながら、降伏荷重に関しては計算値ほど実験値は低下していないことが分かる。今後、部材の耐荷性を評価する上で、鉄筋腐食に伴う鉄筋とコンクリート間の付着性能の低下を考慮して変形性も合わせて検討する必要があるものと考えられる。ただし、本研究で用いた計算方法は、腐食の影響を考慮するための手法として非常に簡便であり、かつ部材の耐荷性を安全側に評価しているため実用的な評価方法であると思われる。今後は更にデータの蓄積を図り、耐荷性の評価に関する推定精度を向上させる必要がある。

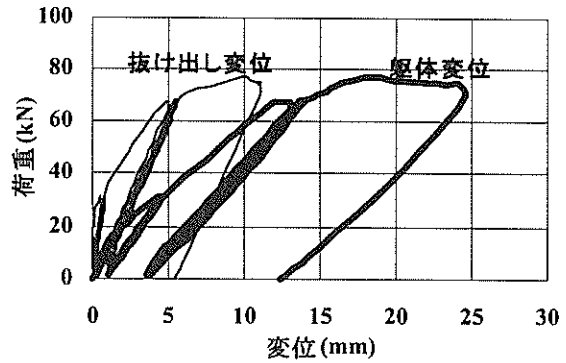
4.2 変形性

図-9に劣化度0～Ⅲの場合の荷重と載荷点変位との関係を示す。なお、実験時に計測される載荷点変位には、部材接合部からの軸方向鉄筋（主鉄筋）の抜け出しによる部材端部の回転角の影響が含まれるため、躯体の剛性を議論するには、この影響を取り除く必要がある。そこで、部材接合部で測定した抜け出し量、有効高さ、中立軸を考慮して、式(2)により接合部端部の回転角を算出し軸方向鉄筋の抜け出しによる載荷点位置での水平変位を求めた。

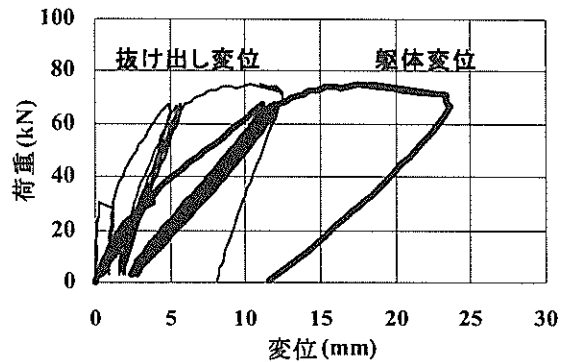
$$\delta = L_a \cdot \theta = L_a \cdot \frac{\Delta L}{(d-x)} \quad (2)$$



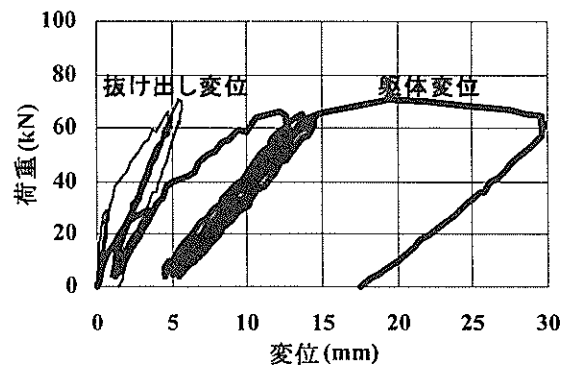
a)劣化度0



b)劣化度Ⅰ



c)劣化度Ⅱ



d)劣化度Ⅲ

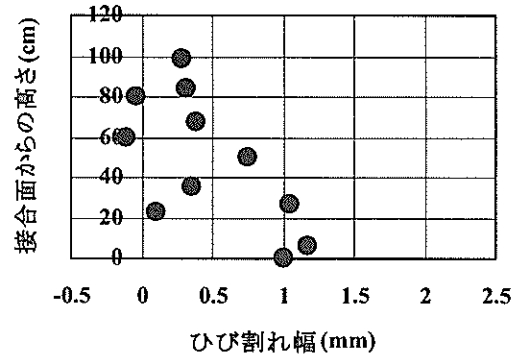
図-9 荷重と載荷点変位の関係

ここに、 δ は主鉄筋の抜け出しによる水平変位、 L_a はせん断スパン長、 θ は主鉄筋の抜け出しによる回転角、 d は有効高さ、 x は中立軸の位置、 ΔL は接合面で測定した抜け出し変位置である。

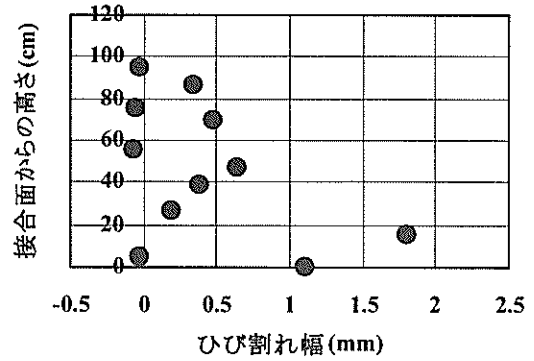
これにより、実験データを軸方向鉄筋の抜け出しによる水平変位と躯体変位に分離した。同図より躯体変位に着目すると劣化度0の試験体と比較して、劣化度が大きくなるにしたがい、鉄筋降伏前では、荷重に対する変位増分は小さくなり、躯体のみかけの曲げ剛性が大きくなっていることが分かる。逆に、鉄筋降伏以降では、劣化度が大きくなるにしたがい、躯体の曲げ剛性は小さくなっている。これは、鉄筋の腐食に伴うコンクリートと鉄筋間の付着性能の低下によって、コンクリートに鉄筋応力が有効に伝達されず、ひび割れ分散性能が低下したために起こった現象と思われる。すなわち、接合部付近に変形が集中したことにより、躯体が剛体的な挙動を示したものと考えられ、躯体のみかけの曲げ剛性の増大として現れている。降伏後における、みかけの曲げ剛性の低下は、変形の局所化により同一変位レベルでの圧縮部コンクリートの負担が大きくなったことに起因していると考えられる。また、図-9d)に示すように劣化度Ⅲの試験体は、鉄筋降伏荷重を越えても抜け出し変位は、他の試験体に比べて小さい。これは、電食終了時にせん断補強筋に沿ったひび割れが既に発生しており、載荷試験時の部材性能を決定したと考えられる支配的なひび割れ位置と一致している。その影響により、部材の塑性ヒンジ領域が載荷点側に移行し、接合面で鉄筋の降伏が起こらなかったためと考えられる。今後、内部鉄筋の腐食により付着性能が低下した部材の変形挙動を評価する手法を検討する必要があると思われる。特に、降伏後の塑性ヒンジ領域をいかに設定するかが重要なポイントになるとと思われる。

4.3 ひび割れ分散性

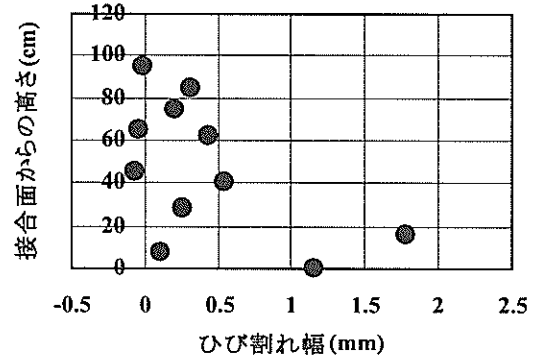
図-10に終局荷重時の柱部材におけるひび割れ幅の分布状況を示す。図-11にT形試験体のひび割れ発生状況を示す。なお、ひび割れ幅は接合部を基準にパイゲージを用いて連続的に測定したものである。図より劣化度0の鉄筋が腐食していない場合のひび割れ幅の分布状況は、部材に作用するモーメント勾配に対応して接合部から載荷点へと徐々に減少している。すなわち、コンクリートと鉄筋の相互作用である付着性能が良好に作用していることが分かる。一方、鉄筋の腐食により鉄筋軸方向に縦ひび割れが発生すると、ひび割れ幅の分布形状が劣化度0とは大きく異なり、接合部近傍の1箇所のひび割れ幅が卓越



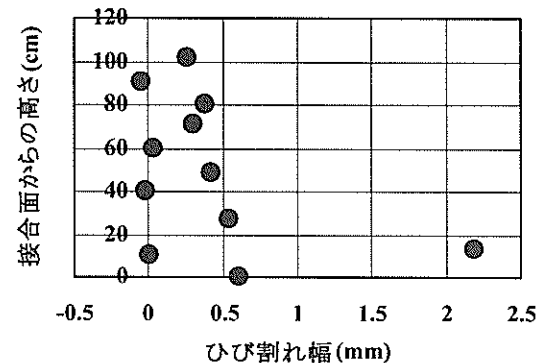
a)劣化度 0(終局荷重：83.0kN)



b)劣化度 I(終局荷重：78.8kN)



c)劣化度 II(終局荷重：76.5kN)



d)劣化度 III(終局荷重：72.3kN)

図-10 ひび割れ幅の分布 (終局荷重時)

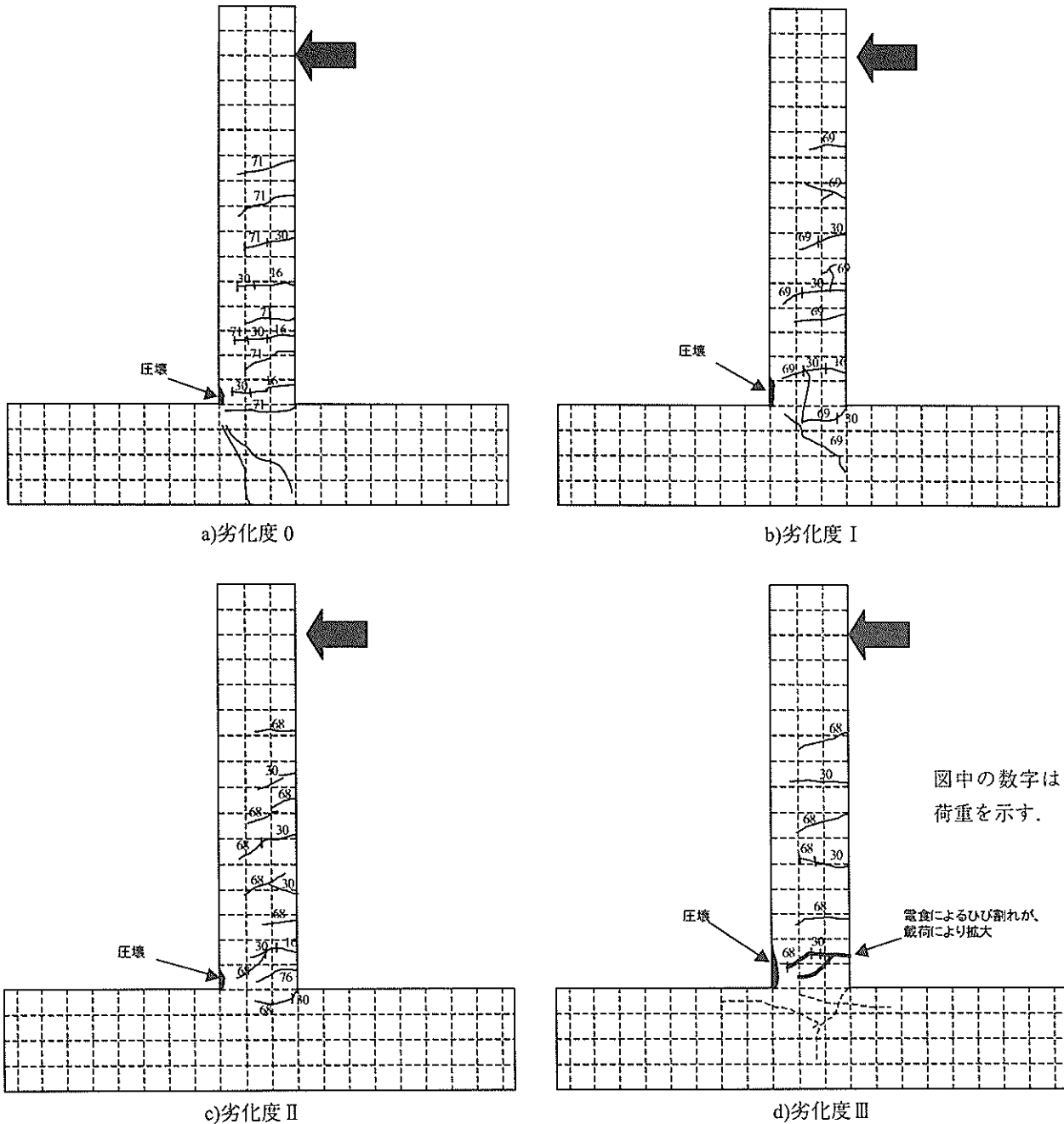


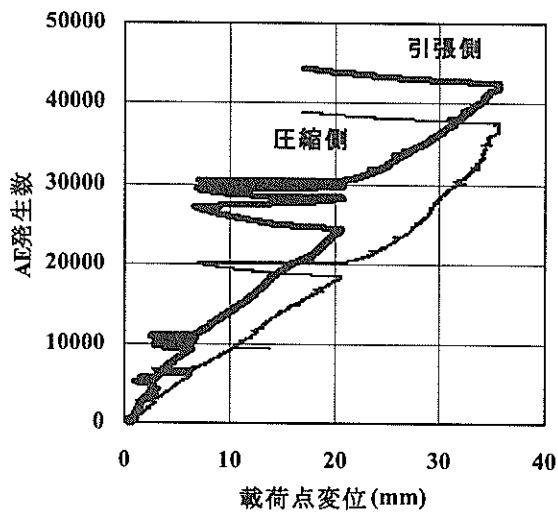
図-11 T形試験体のひび割れ発生状況

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、ひび割れ発生状況からみても分かるように、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なっている。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最も劣化度が大きいⅢの場合は7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拡大する。その結果、4.3に示したように、変形が

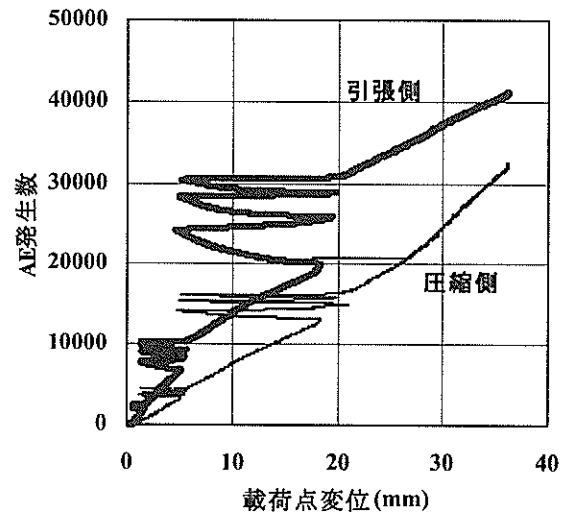
局所的に進行し破壊にいたる現象を引き起こすことになる。なお、劣化度Ⅲの試験体は、4.2で記したように、接合面で鉄筋が降伏していないと考えられ、接合面でのひび割れ幅も他の試験体に比べて小さい。

5. 鉄筋の腐食状態がAE発生特性に与える影響

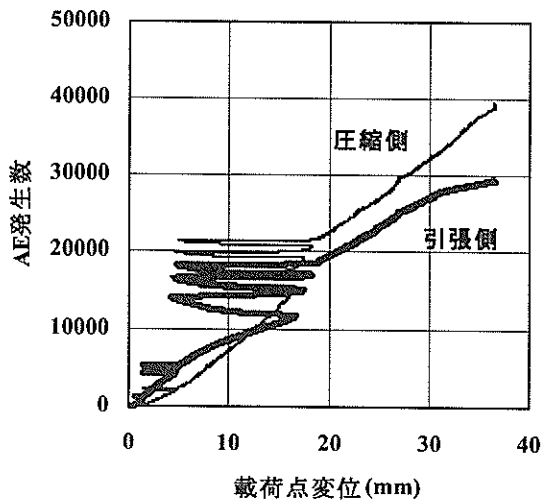
実構造物における部材損傷度の定量的評価を目的として、内部鉄筋が腐食したT形試験体のAE発生特性について検討した。2.2で記したように、電食期間が長いほど、



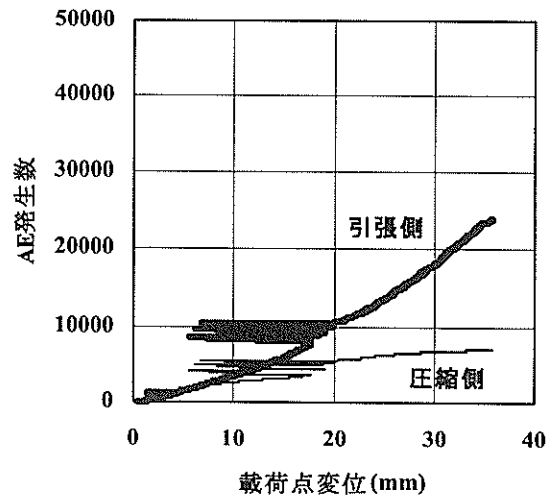
a)劣化度 0



b)劣化度 I



c)劣化度 II



d)劣化度 III

図-12 載荷点変位と AE 発生数との関係

すなわち内部鉄筋の腐食が進行するほど検出されるAEの個数が増加する結果が示されている(岩波ら, 2000)。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している。図-12に劣化度の異なる各試験体の載荷点変位に対するAE発生数との関係を示す。同図より載荷点変位に対するAE発生数は、劣化度が大きく鉄筋腐食が進行するほど小さくなる傾向が認められる。また、終局時までの最終的なAE発生数も劣化度の進行に伴い少なくなっている。図-13に許容応力レベルで繰り返し載荷を行った際のAE発生数を示す。図より許容応力レベルで繰り返し

載荷を行った場合のAE発生数は、先に示した全体的な挙動とは異なり、劣化度 I の試験体が最も多く、劣化度 0、II、IIIの順序でAE発生数が減少している。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岩波らによって得られた結果とは、劣化度に伴うAE発生数の大小関係が逆転し異なった傾向を示している。AE信号パラメータ解析を部材損傷度の相対的評価に利用することを考えると、両者のAE特性の相違を検討しておくことは重要である。以下に考え得る原因を考察する。なお、両者の計測システムや設定したしきい値は同じであるので、計測上の相違は全くないと考えられる。ここで、アコースティック・エミッションの定義に立ち帰ると、2.2(2)でも示したように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」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。RC部材が鉄筋腐食により損傷を受けると、鉄筋とコンクリート間の付着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に引張応力に起因して部材内部に潜在的な発生源が増加することは十分に考えられる現象である。本研究の範囲においても、許容レベルにおける発生数は、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AE発生数は多くなっており、上記の考えを裏付ける結果となっている。しかしながら、劣化度Ⅱ、Ⅲの試験体は逆にAE発生数が少なく、潜在的な発生源が腐食により少なくなったことを示している。これは、4.3で示したように、鉄筋とコンクリート間の付着性能の低下により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発生数が減少したこと、およびひび割れ分散性の低下により、荷重による曲げひび割れの絶対的な本数が減少したことに起因すると考えられる。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特性が変化すると考えられる。

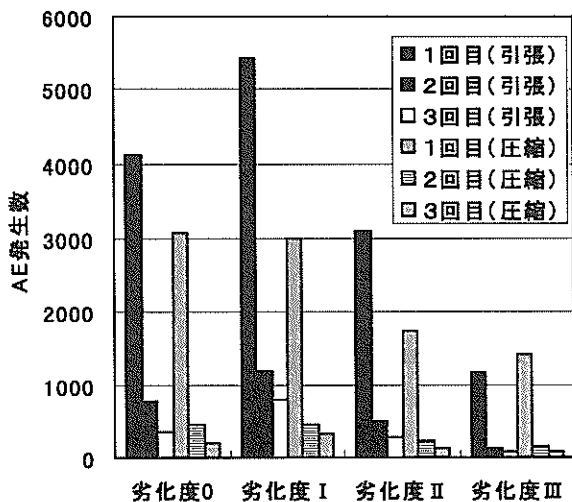


図-13 許容応力レベルのAE発生数

6. 電気化学的手法による腐食状態の検討

6.1 自然電位

図-14に劣化度Ⅰ、ⅡのT形試験体の柱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-4参照）に対応する鉄筋の直上で測定したものである。この図より、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、荷重点に近づくほど、貴側に移行している。この傾向は、荷重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（ASTM, 1977）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異なっている。実際の腐食状況と自然電位の測定結果との対応をはかると、90%以上の確率で腐食ありと判定される自然電位のしきい値は-500mV程度となる。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（武若ら, 1983）。また、自然電位の測定値は、コンクリート表面の中酸化や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受けるとされており、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。

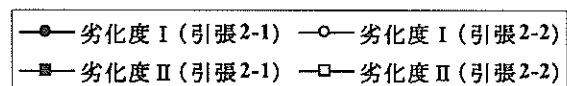


図-14 自然電位の分布

6.2 分極抵抗

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線形の相関関係が存在する。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-15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84%となっており、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、測定間隔を密にすることにより腐食量の推定精度を更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手法の適用を考えると、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。

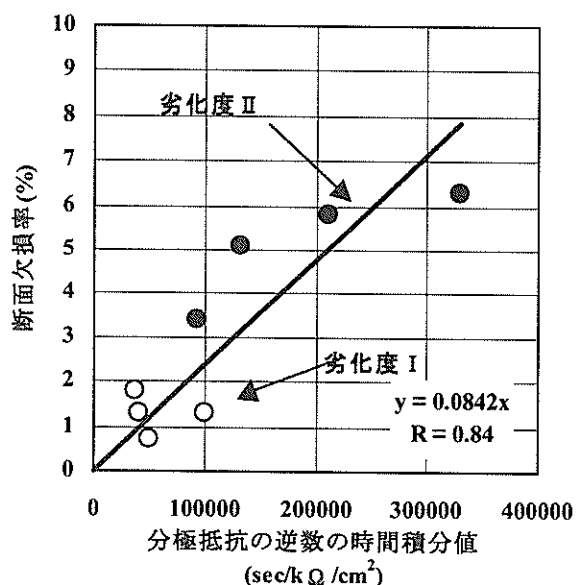


図-15 分極抵抗の逆数の時間積分値と断面欠損率との関係

7. 結論

本研究では、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載荷試験を行うことで、内部鉄筋の腐食状態が耐力・変形性などの力学的性能に与える影響について検討した。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手法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終局荷重が低下し、断面欠損率と耐力との間に相関関係が認められた。

また、鉄筋の断面欠損率と不均一な腐食によって発生する応力集中の影響を降伏強度の低下として考慮することで、耐力への影響を概ね評価できた。

- (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、ひび割れ分散性能が低下した。これにより、部材接合部付近に変形が局部的に集中し終局破壊に至った。この接合部における変形の局所化により鉄筋降伏以前の躯体のみかけ曲げ剛性は、腐食していないものに比べて大きくなった。逆に鉄筋降伏以降は、同一変位レベルでの圧縮部コンクリートの負担が大きくなることにより曲げ剛性が小さくなったと考えられる。
- (4) 許容耐力レベルにおける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発生数は小さくなった。この結果は、梁試験体により鉄筋腐食とAE特性との関係を検討した際に得られた、腐食の進行した梁ほどAEが多く発生するという既往の知見と異なったものとなった。これは、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、塩分濃度の影響が大きいという知見もあり、今後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良好な関係があり、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。

8. 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ことによる耐力および変形性に与える影響を把握することができた。また、部材損傷度を評価するためのAE計測および電気化学的手法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、腐食による力学性能の変化を合

理的かつ定量的に評価したとは言えず、多くの課題が残されている。特に部材の変形問題に関しては、鉄筋腐食に起因する鉄筋とコンクリート間の付着性能の低下を、部材変形を評価する際にどのように取り入れるかが、重要な課題になると思われる。また、耐荷性についてもせん断補強筋が腐食したことによりせん断耐力が低下し、曲げ破壊からせん断破壊に破壊モードが移行する危険性も十分に考えられる。まずは、腐食による影響を定量的に曲げ引張破壊の耐力評価式に反映し、評価精度を向上させることが先決であるが、考え得る様々な腐食状況を念頭に置き力学性能の変化を検討する必要がある。また、力学的性能を合理的かつ定量的に評価できる手法が確立できたとしても、評価の際に必要な腐食状態に関する定量的な情報が得られない限り実構造物に適用することは出来ない。したがって、非破壊試験は腐食に関する情報を定量的に評価できる可能性があり有望である。今後さらに実験室レベルでの推定精度を向上させるとともに、実構造物レベルにおいても調査データを収集・蓄積し室内データとの対応を明確にさせる必要がある。

(2001年5月30日受付)

参考文献

- 岩波光保, 横田 弘, 秋本 孝 (2000): 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
- 運輸省港湾技術研究所 編著 (1999): 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, 沿岸開発技術センター, pp.95-97.
- 大津政康 (1993): アコースティック・エミッションの特性と理論, 森北出版
- 古玉悟, 田邊俊郎, 横田弘, 濱田秀則, 岩波光保, 日比智也 (2001): 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
- 武若耕司, 小林一輔(1983): 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.
- 土木学会 腐食防食委員会(1997): 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
- 日本コンクリート工学協会(1998): 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.
- 横田優(1995): 鉄筋腐食診断機の開発, 電力土木, No.257, pp.64-71.
- ASTM(1977): Half Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steels in Concrete ,ASTM C876-77.

港湾空港技術研究所資料 No.1006

2001.9

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL.0468(44)5040 URL.<http://www.pari.go.jp/>

印刷所 株式会社 あんざい

Copyright © (2001) by PARI

All rights reserved. No part this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI.

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。