

論文 塩害がRC部材の耐震性に与える影響について

小林 孝一*1・志知裕幸*2・榊原吉正*2

要旨: 近年, 鉄筋コンクリート (RC) 構造物の早期劣化が重大な問題となっており, その原因の一つとして塩害があげられる。そのような構造物を適切に維持管理するためには, 劣化程度を適切に把握する必要がある。そこで本研究では, 塩害劣化RC部材に対して正負交番载荷を行ない, その耐荷力あるいは靱性能等, 耐震性能について検討を行なった。その結果, 終局に至るまでの累積消散エネルギーは劣化の進展とともに大きく低下した。

キーワード: RC部材, 塩害, 正負交番载荷, 耐震性, 消散エネルギー

1. はじめに

鉄筋コンクリート (RC) 構造は適切に設計, 施工, 維持管理された場合には, 極めて耐久性に富むが, 近年その早期劣化が問題となっており, 早急な対策が求められているのが現状である。

このような状況の下で, 土木学会コンクリート標準示方書[施工編]¹⁾は, 耐久性に関する性能照査を行なう性能規定型に改定され, またあらたに示方書[維持管理編]²⁾も制定されるなどの対応がとられている。しかし各種要因による劣化の進展が部材の耐荷性能等の各種機能に与える影響については, 現在までのところ定量的に明らかにされているとは言い難く, したがって, 適切な構造物の寿命評価, あるいは維持管理を行なうのは, いまだ困難がともなうのが現状であるといえる。

そこで本研究では, 劣化の中でも比較的被害が大きな塩害を対象として, その進展がRC部材の耐荷性能, 特に大変位が作用した場合の耐震性能に与える影響を明らかにし, 劣化度と耐荷性能との定量的な関係を把握することを目的とした。

2. 実験概要

2.1 供試体

本研究では, RC柱部材の塩害劣化

を対象とするが, 供試体作製および実験遂行を容易にするために, 上縁および下縁に主筋を有するスパン1400mmのはり部材を用いた (図-1)。

供試体にはせん断破壊が生じないようにスターラップを100mm間隔 (せん断補強筋比0.47%) で配置した。また部材の大変位域における耐荷性能に対する鉄筋腐食の影響を検討するために, 供試体の中央部分の純曲げ区間に加えて供試体の有効高さに相当する区間に, スターラップを間隔60mm (横拘束筋比1.6%) で配置した。この値は横拘束筋比が1.2%であれば十分な曲げ靱性が得られると報告されている³⁾ことを参考にした。

また主筋にはD10, せん断補強筋および横拘束筋にはφ6を用いた。鉄筋の品質を表-1に示す。

コンクリートは劣化を促進するためにW/C=0.6とした。供試体は全32体作成したが, そ

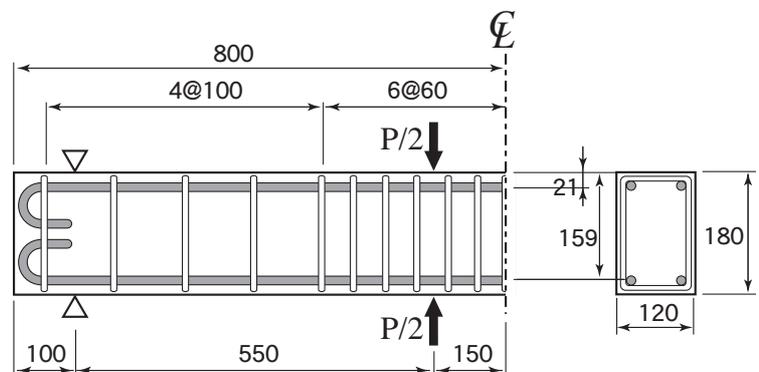


図-1 供試体

*1 中部大学 工学部土木工学科講師 博(工) (正会員)

*2 中部大学 工学部土木工学科

のうちNo. 1~16の16体をAシリーズ、残りNo. 17~32の16体をBシリーズとした。

Aシリーズは通常のW/C=0.6のコンクリートを使用した。打設後1ヶ月間は散水養生を行ない、その後は16体のうちのNo. 1~4の4体に対しては引続き水道水の散布を続けた。残りNo. 5~16の12体には5%NaCl溶液(Cl⁻濃度は約3%)を週に2日程度散布し、海洋環境における海水の作用および塩害の進展を模した。

BシリーズはAシリーズと同様にW/C=0.6としたが、あらかじめコンクリート練り混ぜ時に鉄筋の発錆限界¹⁾とされる1.2kg/m³の10倍に相当する12kg/m³のCl⁻をNaClの形で混入し、劣化の促進を図った。ただしBシリーズ中のNo. 17~20の4体の供試体は、Aシリーズと同様に水道水による練り混ぜを行ない、作製時にCl⁻は混入していない。Bシリーズの供試体はいずれも水道水の散布を脱型直後から続けた。これら供試体の一覧を表-2に示す。

2.2 載荷方法

載荷試験は、材齢0.5年から4年の間に順次行なった。本研究では、1). 一方向単調載荷、2). 一方向載荷と除荷の繰り返し、3). 正負交番載荷、の3種類の載荷を行なったが、紙面の都合上、本論文では正負交番載荷の結果のみを報告する。

RC部材の耐震性能を検討するために行なった正負交番載荷試験は、スパン中央の変位が降伏変位 δ に達した時点で載荷方向を180°反転させ、変位が $-\delta$ に達した後は、 2δ , -2δ , 4δ , -4δ , …… $2n\delta$, $-2n\delta$ と、部材が終局に至るまで載荷を繰り返した。

ここで部材の降伏変位 δ は、本研究のように腐食によって鉄筋断面が減少している場合には、本来は劣化の進行程度により部材毎に値が異なる。しかし載荷試験前に内部の鉄筋の腐食状況を

正確に把握することが困難であり、また供試体作製時に鉄筋にひずみゲージを添付しても、ひずみゲージおよび鉄筋の腐食により、載荷試験時に鉄筋の降伏を検知することも不可能である。そこで材齢28日でのコンクリート強度と腐食前の鉄筋強度を用いて計算し、 $\delta=3\text{mm}$ という値を得て、すべての供試体に対してこの値を適用して載荷試験を行なった。

また部材の終局は、荷重-変位曲線の包絡線上で荷重が最大荷重の80%まで低下した時点とした。これは上記のように降伏点が不明瞭であるため、終局荷重を降伏点荷重に等しいとする定義⁴⁾の適用が困難であるためである。

2.3 鉄筋腐食減量の測定

載荷試験終了後、部材のできるだけ端部に近く、曲げ載荷の影響が小さいと考えられる部分から長さ約400mmの主筋をはつり出し、60℃の10%クエン酸二アンモニウム水溶液に24時間浸漬することにより、主筋の腐食減量を求めた。その後、標点間距離を8D(=約76mm)として引張試験を行なうことにより、主筋の降伏強度、引張強度、破断時の伸び率を求めた。

3. 実験結果と考察

表-3に材齢28日におけるコンクリートの圧縮強度を示す。Bシリーズに用いられたコンクリートの強度が小さいのは、塩化物イオンの減水効果に加え、施工不良を想定してやや大きめの単位水量を採用したため、非常に軟練り(スランプ約15cm)のコンクリートとなり、大量にブリーディングが発生し、硬化体組織が粗くなったためであると考えられる。

図-2に、RCはり部材から載荷試験後にはつり出した主筋の腐食減量と強度あるいは破断時の伸

表-1 使用した鉄筋の品質

	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	破断時 伸び(%)
D10	391	545	29.8
φ6	339	490	30.0

表-2 供試体一覧

	供試体	練混ぜ	散水
Aシリーズ	No.1~4	水道水	水道水
	No.5~16		5%NaCl溶液
Bシリーズ	No.17~20	Cl ⁻ =12kg/m ³	水道水
	No.21~32		

表-3 コンクリートの圧縮強度（材齢28日）

	Aシリーズ	Bシリーズ	
	No. 1~16	No. 17~20	No. 21~32
圧縮強度 (N/mm ²)	35.5	25.5	26.4

表-4 荷重時期とひび割れ幅

	荷重時期	ひび割れ幅 (mm)
健全供試体	2000年	0
	2000年	0.25~0.50
劣化供試体	2001年	0.40~0.90
	2003年	0.80~1.50

びとの関係を示す。なおいずれの鉄筋も降伏棚を有していた。

腐食の進行は降伏強度、引張強度の低下よりも伸び能力の低下に大きく影響を与え、もっとも腐食の進行したものでは伸び能力は当初の三分の一程度まで低下している。腐食減量が3から4%程度の場合には、その腐食グレードは5段階のうちグレードIVに相当し⁵⁾、また腐食グレードが4段階評価のうちグレードIVの場合には、鉄筋の伸び性能は当初の35%程度まで低下するとされているため⁶⁾、ここで得られた結果は、おおむねこれら既往の研究の結果と一致する。

また主筋の腐食に起因するかぶりコンクリートの軸方向ひび割れの幅のうち、それぞれの部材中で荷重直前時点での最大のものを表-4に示す。なお、供試体の作製を行なったのは、Aシリーズは1999年、Bシリーズは2000年である。かぶりが小さいため、極めて初期から主筋の腐食にともなう軸方向ひび割れが発生したが、材齢の経過と

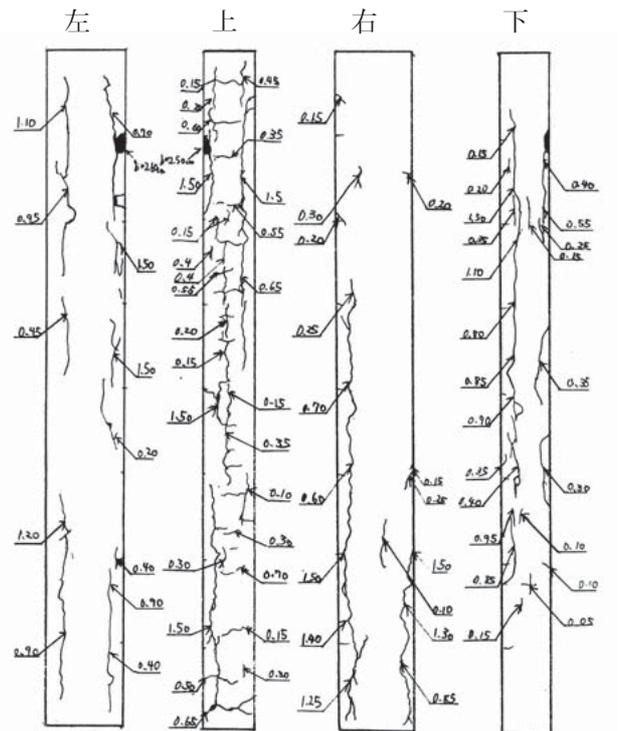


図-3 荷重前のひび割れ分布の例

ともにかぶりのひび割れは拡大した。

2003年に荷重試験を行なった供試体において、荷重直前に行なったひび割れ状況のスケッチの例を図-3に示す。この供試体は外見から判断される劣化がもっとも進展していたが、腐食ひび割れの進展にともなうコンクリートの剥離、剥落が生じたのはこの供試体のみであった。また、劣化初期には供試体下部において上部よりもひび割れの発生量が多い傾向にあったが、2003年に荷重を行なう時点では、そのような傾向は有意ではなく、供試体上部と下部においてひび割れの本数、幅などについては大差なかった。

図-4に荷重履歴曲線の例を示す。当初、終局

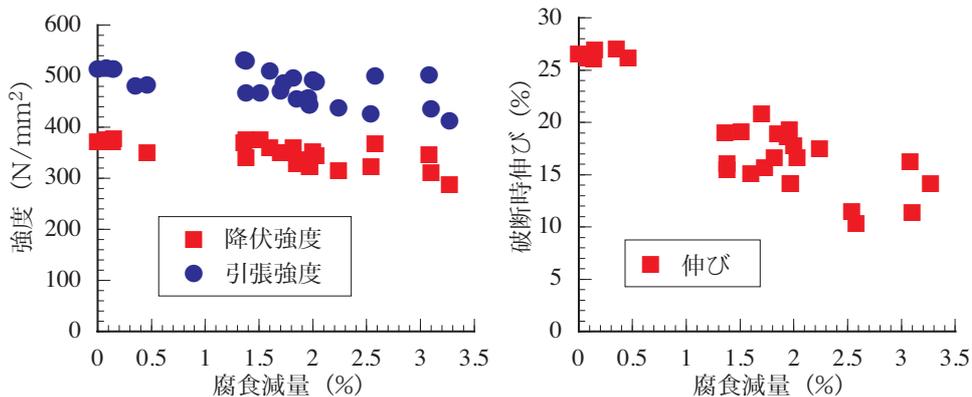


図-2 鉄筋の腐食減量と性能の低下

時の靱性率は20程度であったが、この値は劣化の進展とともに徐々に減少し、主筋の腐食減量率が3.3%、かぶりコンクリートの軸方向ひび割れ幅が1.5mm程度になった段階では、14程度まで低下した。それにつれ部材終局までの累積消散エネルギーも低下することとなる。なお、表-4に示した荷重時期別に破壊形式を分類すると、2000年に実施した荷重試験では、供試体はすべて曲げせん断破壊にて終局を迎えた。2001年には4体中3体が主筋破断で残りは曲げせん断破壊、2003年には5体中3体が主筋破断で残りが曲げせん断破壊により終局となった。図-5に荷重によって曲げせん断区間の荷重点に隣接する位置に曲げせん断破壊の生じた供試体の例を示す。なお主筋が破断した場合にも、破断位置は曲げせん断によりコンクリートが大きく剥落した部分であった。

なお、本研究の範囲内では、スターラップの腐食量は主筋の腐食量よりも小さく、荷重試験時に



図-5 荷重後の供試体の例(上:健全供試体,下:腐食減量率1.5%,ひび割れ幅0.9mm)

破断も生じなかった。またスターラップは寸法が小さいために、腐食後に引張性状の試験を行なうことはできなかったが、上記のような理由からスターラップの腐食がRC部材の耐荷性状に与えた影響は小さいものと考えた。

図-6にRC部材の耐荷力や終局時の靱性率、累積消散エネルギーと、部材内部の主筋の腐食減量率、引張強度、破断時の伸びとの関係を示す。なお本来は部材中の破壊が生じた部分に存在した鉄

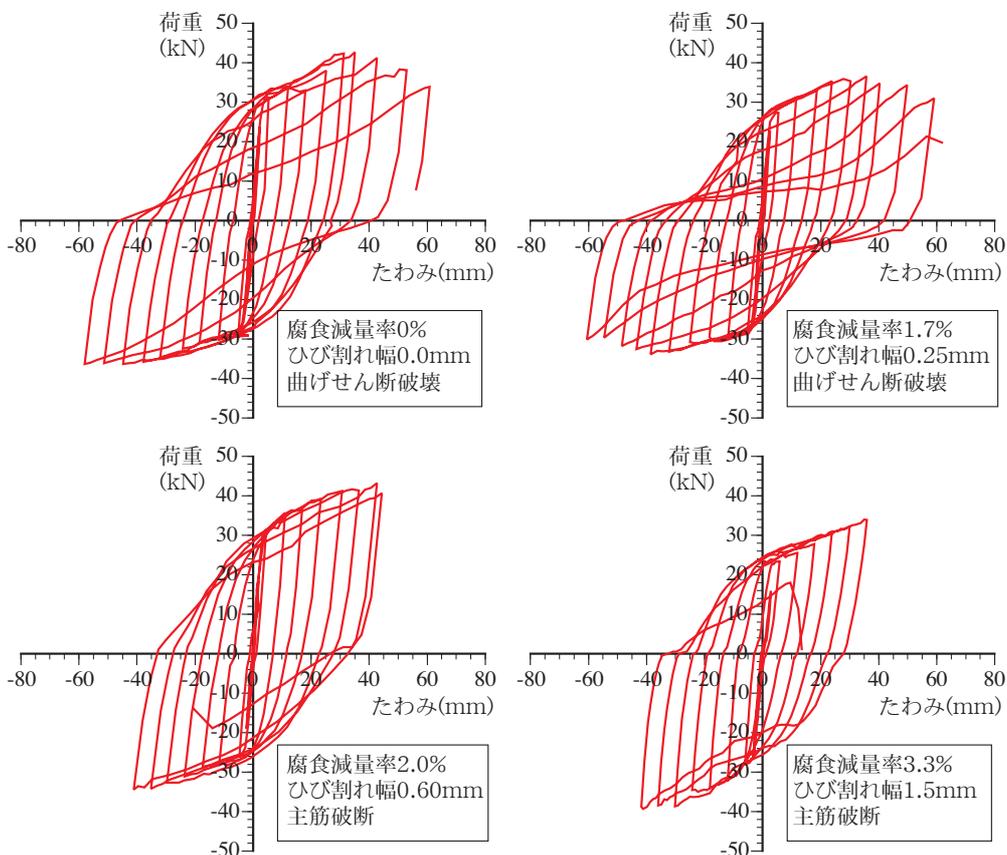


図-4 荷重履歴曲線の例

筋の品質を論じるべきであるが、そのような部分の鉄筋は荷履歴の影響を受けているため、部材内で腐食速度の不均一はそれほど大きくないとみなし、できるだけスパン端部に近い部分からは取り出した鉄筋の品質と比較を行なうこととした。またAシリーズとBシリーズの結果の間に顕著な差はなかったため、以降、両者から得られた結果を区別せずに示す。

主筋の腐食が進行し、腐食減量が増加するにしたがって、RC部材の各種耐荷性能は低下する傾向にある。特に影響が著しいのが、終局までの累積消散エネルギーであり、もっとも劣化の進行したものでは当初の値の1/2程度まで低下している。したがって部材の耐荷力の低下がそれほど顕

著ではない程度の劣化状態であっても、地震力などの大変位繰り返し荷の影響を受ける場合においては、その耐荷性能の低下は著しいということになる。

主筋の引張強度に着目すると、RC部材の耐荷力は主筋の引張強度に依存しているが、部材の靱性率、累積消散エネルギーとの相関はそれほど明瞭ではない。

また主筋の伸び率の低下にともない、RC部材の累積消散エネルギーは低下するものの、部材の靱性率の低下との相関は小さかった。部材のうち約2/3が鉄筋の破断によらず終局に至っているのに加え、上述のように、主筋の破断は支点直外の曲げせん断域で生じており、純引張に加えて座

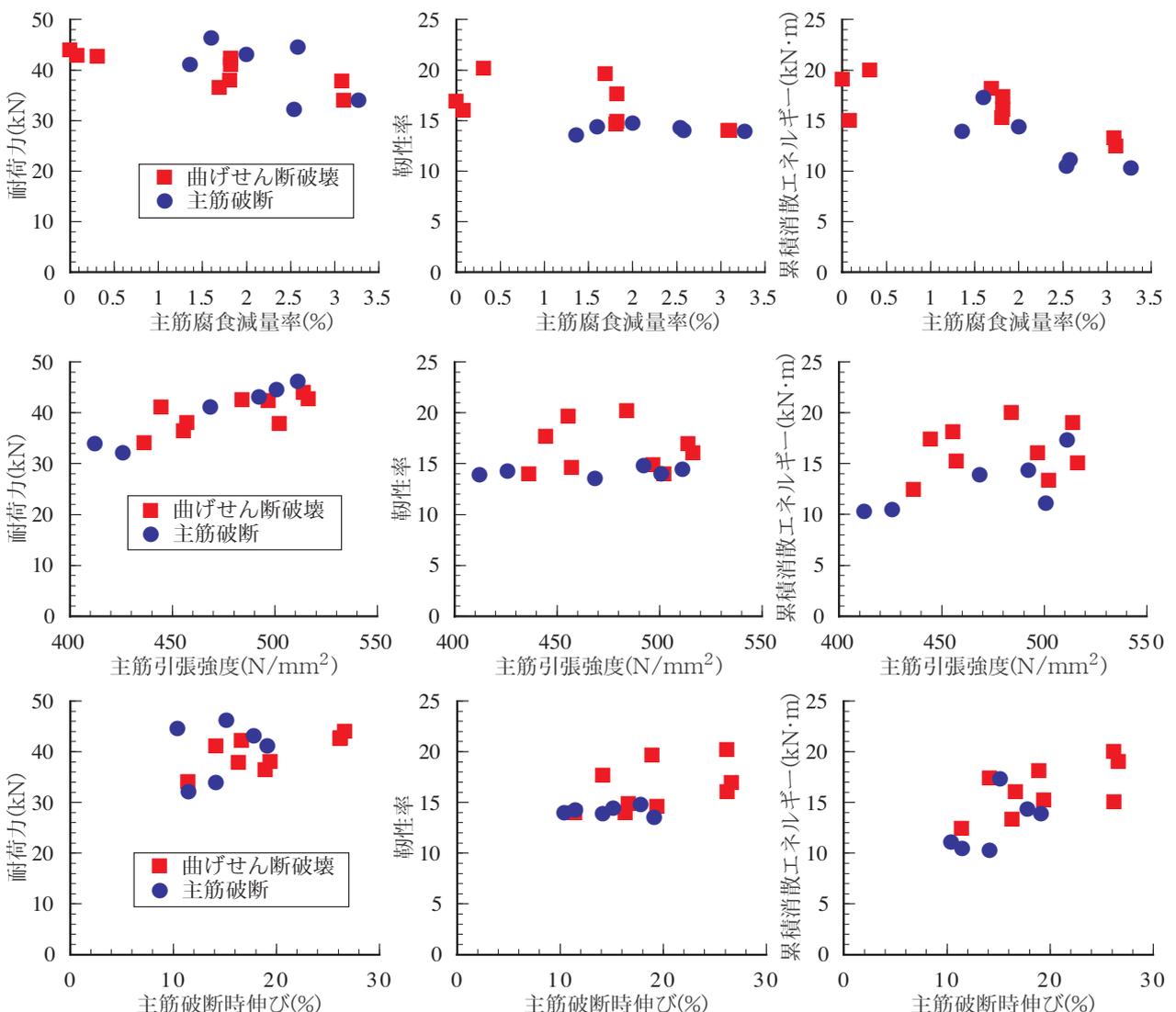


図-6 鉄筋腐食の進行とRC部材の性能の低下

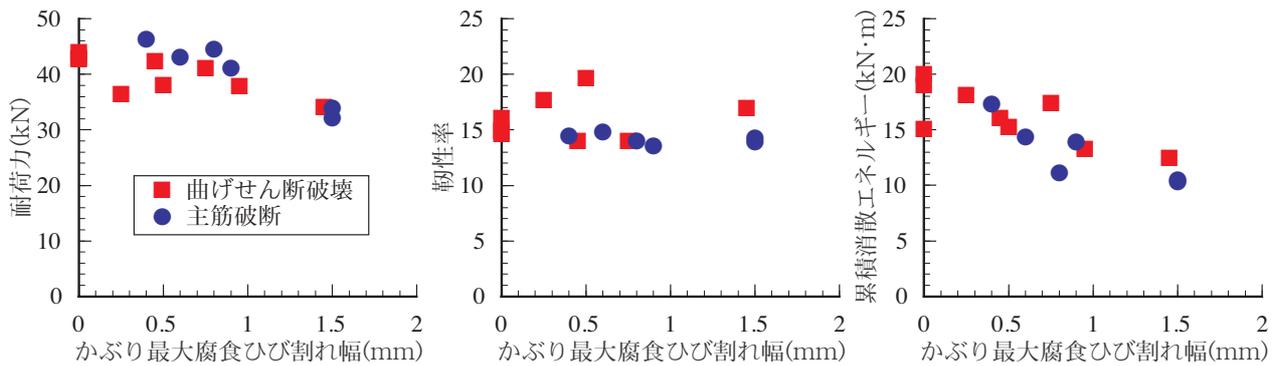


図-7 かぶりのひび割れ幅の拡大とRC部材の性能の低下

屈やせん断現象も作用しているために、主筋の伸び性能が部材の靱性に与える影響が小さいという結果になったものと考えられる。

また図-7に、荷重直前の時点におけるかぶりコンクリートに生じた軸方向腐食ひび割れのうち、最大の幅と、RC部材の各種耐荷性能との関係を示す。ここでは部材中における発生部位等は考慮せず、部材中で最大のひび割れ幅を用いた。

ひび割れ幅の増大にともない、部材の耐荷力あるいは累積消散エネルギーは低下する。特に、かぶりコンクリートのひび割れ幅が小さな段階においても、累積消散エネルギーの低下は著しい。ひび割れが発生した段階、すなわち劣化が進展期から加速期に移行した段階においては、すでに鉄筋の腐食はある程度まで進行しているが、この段階では耐荷力の低下はまだ顕著ではないにもかかわらず、累積消散エネルギーのみが低下している。

図-4に示した荷重曲線のうち、ひび割れ幅が0mmのものと0.35mmのものを比較すると、荷重前から腐食によるひび割れを有していたものは、各サイクルの大変位域における部材剛性が小さい。そのため累積消散エネルギーが小さくなったものと考えられるが、部材剛性が小さいのは、曲げ区間、あるいは曲げせん断区間の荷重点に隣接する部分におけるコンクリートの剥落が激しい(図-5参照)ためであると考えられる。

4. 結論

本研究では塩害劣化RC部材の耐震性能について検討を行ない、以下のような結論を得た。

- (1) 腐食は鉄筋の強度よりも伸び性能の低下に与える影響が大きい。
- (2) 劣化の進展にともない、RC部材の破壊形式は曲げせん断破壊から鉄筋の破断に移行した。
- (3) 腐食劣化の進展にともない、RC部材の耐荷力、累積消散エネルギーは低下した。
- (4) RC部材の耐荷力の低下は鉄筋の強度低下とよい関係にあった。
- (5) かぶりコンクリートに腐食ひび割れが発生することにより、劣化の加速期のごく初期から耐震性能の低下が生じた。

参考文献

- 1) 土木学会：2002年制定コンクリート標準示方書[施工編]，2002.3
- 2) 土木学会：2001年制定コンクリート標準示方書[維持管理編]，2001.1
- 3) 服部篤史ほか：横拘束コンクリートのはり部材への適用に関する検討，土木学会第44回年次学術講演会概要集第5部，pp.504-505，1989.10
- 4) 土木学会：2002年制定コンクリート標準示方書[耐震性能照査編]，2002.12
- 5) 梶田佳寛ほか：鉄筋腐食度評価式の検討，日本建築学会大会（北陸）学術講演梗概集A，pp.1051-1052，1992.8
- 6) 森永繁：鉄筋の腐食速度に基づいた鉄筋コンクリート建築物の寿命予測に関する研究，東京大学学位論文，1986