

論文 鉄筋腐食したRCボックスカルバートのせん断耐荷力に関する実験的検討

松尾 豊史^{*1}・松村 卓郎^{*2}・岩森 暁如^{*3}・玉田 潤一郎^{*4}

要旨：本研究では、経年劣化した鉄筋コンクリート製地中構造物の構造性能に着目した健全性評価手法を作成するための実証的なデータを取得することを目的として、実規模試験体の載荷により鉄筋腐食したRCボックスカルバートのせん断耐荷力を評価した。その結果、鉄筋腐食量が10%を超える状態においてもせん断耐荷力の低下度合いは比較的小さいことなどが明らかとなった。これは、ボックスカルバートが不静定構造のため、構造性能が局所的な劣化の影響を受けにくいためと考えられる。

キーワード：ボックスカルバート、せん断耐荷力、鉄筋腐食、載荷試験、電食

1. はじめに

経年劣化した鉄筋コンクリート構造物の健全性を合理的に評価するためには、材料劣化と構造性能の関係を明確にしていける必要がある。

一般的なRC構造物に生じる代表的な劣化現象は、鉄筋腐食を伴う場合が多い。鉄筋が腐食した鉄筋コンクリートでは、腐食により鉄筋の断面積が減少するだけでなく、鉄筋とコンクリートの付着劣化、鉄筋の腐食膨張によるひびわれの発生と進展などの種々の現象が生じる。鉄筋腐食に関しては、現在までに、数多くの研究がなされており、鉄筋腐食が鉄筋コンクリートの力学特性に与える影響についての研究が精力的に進められている¹⁾。しかしながら、材料劣化が構造性能に及ぼす影響に関する研究は、部材を対象とした検討がほとんどであり、構造物を対象とした研究事例²⁾は極めて少ない。

本研究は、鉄筋コンクリート製地中構造物の構造性能に着目した健全性評価手法を作成するための実証的なデータを取得することを目的としている。このため、実環境を想定した電食を実施し、部分的に鉄筋腐食させた試験体の実規模載荷試験を行うことにより、鉄筋腐食したRCボックスカルバートのせん断耐荷機構について検討し、せん断耐荷力に与える鉄筋腐食の影響を評価した。

2. 実験概要

2.1 実験条件

(1) 試験体の仕様

実験では、地中に埋設された1連ボックスカルバートを対象とした。試験体の形状寸法と配筋状態を図-1に示す。構造物寸法は幅3.0m×高さ3.8mであり、側壁と

頂版の部材厚は60cmである。主筋にはD19を用い、側壁にはせん断補強金筋を配置していない。想定する破壊モードは、せん断破壊モードである。また、主筋の芯かぶりが100mm、純かぶりが90.5mmである。各種条件は、「屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針<照査例Ⅱ>」³⁾を参考にして設定した。

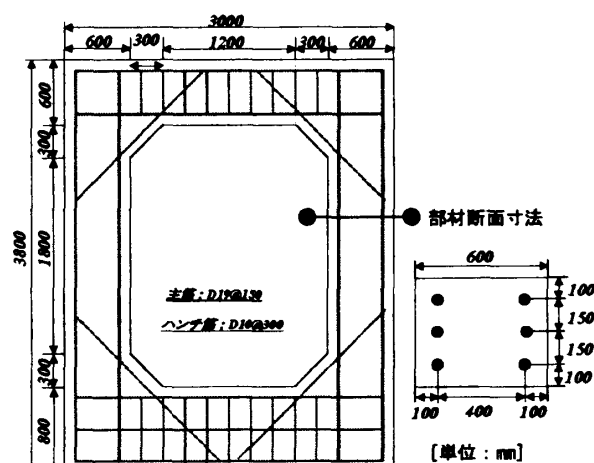


図-1 試験体の形状寸法と配筋状態

(2) 実験ケース

本実験における実験ケースを表-1に示す。検討するパラメータは、①劣化程度と②劣化箇所である。

劣化程度については、腐食なしと腐食小、腐食大の3段階とした。腐食小に関しては、コンクリートの腐食ひびわれが発生した時点とする。腐食大については、ひびわれから錆び汁が発生し、明らかな断面欠損のある状態とする。また、劣化箇所については、図-2に示すような部材中央部と部材端部に鉄筋腐食が生じた状態を想定した。区間Ⅰは、構造物の内側に、鉄筋軸方向に沿った鉛直方向のひびわれが発生することを想定している。

*1 電力中央研究所 地球工学研究所 構造工学領域 主任研究員 工修 (正会員)

*2 電力中央研究所 地球工学研究所 構造工学領域 上席研究員 工博 (正会員)

*3 関西電力株式会社 土木建築室 原子力土木建築グループ (非会員)

*4 関西電力株式会社 土木建築室 原子力土木建築グループ (非会員)

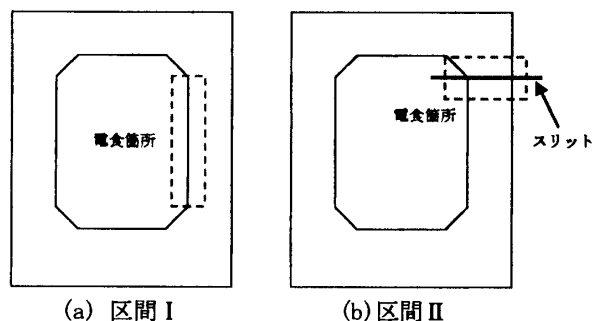
区間Ⅱは、側壁上端部の内外面における鉄筋が腐食することを想定している。この部位は海水の干満作用を受けやすい箇所を想定したもので、L2A 試験体については鉄筋腐食が最も顕著なケースとして、試験体には側壁上端部にあらかじめ貫通したスリットを設けその影響を考慮することにした。

(3) 材料特性

実験に用いた鉄筋とコンクリートの材料試験結果を表－2に示す。主筋には、高強度のSD490を用いて、曲げ耐力を増加させることにより、試験体をせん断破壊しやすい条件とした。コンクリートには、普通ポルトランドセメントを用いた。試験期間中のコンクリート強度に若干の増加が見られたが、コンクリートは打設後2ヵ月以上経っていたため、全ての試験体について頂版、側壁、底版のコンクリート強度の差異は小さいと言える。

表－1 実験ケース一覧

No.	呼称	劣化程度	劣化箇所	スリット
1	NNN	なし	なし	なし
2	S1N	腐食小	区間Ⅰ	なし
3	L1N	腐食大	区間Ⅰ	なし
4	L2A	腐食大	区間Ⅱ	あり



図－2 劣化箇所

表－2 材料試験結果

(a) 鉄筋の機械的性質 (SD490)

降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	伸び (%)
515	698	18

(b) コンクリート圧縮強度 (N/mm²)

	頂版	側壁	底版
NNN	33.8	33.9	35.4
S1N	34.0	37.5	34.9
L1N	32.9	33.3	33.2
L2A	35.6	37.8	34.8

2.2 実験方法

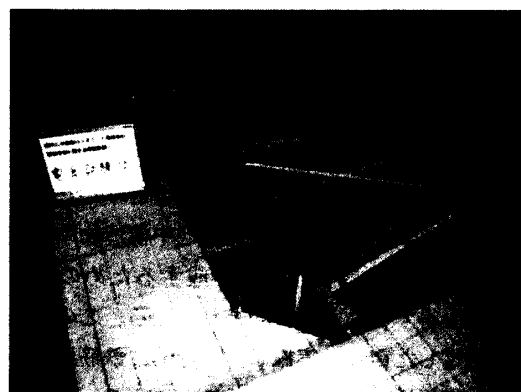
(1) 電食

鉄筋腐食を生じさせるために、比較的短期間に鉄筋を腐食させることが可能な電食を実施した。図－3には、区間Ⅰの電食の実施状況を示す。試験体の電食区間を3%NaCl溶液に浸し、鉄筋をプラス極、溶液内に設置した鋼製エキスパンドメタルをマイナス極として、直流定電流を通電する。

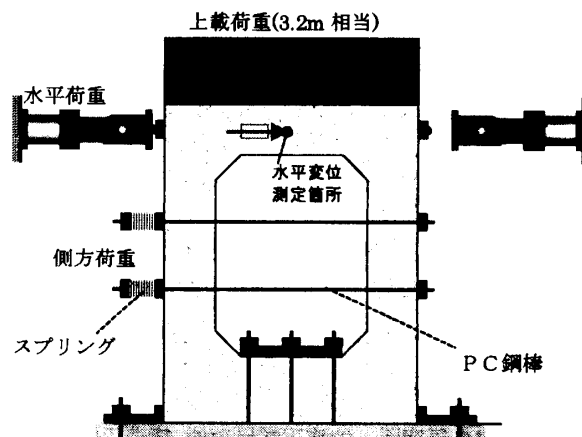
鉄筋の腐食量は積算電流量(電流値×時間)に概ね比例する。積算電流量は、腐食小が600Ah、腐食大が2400Ahである。すなわち、腐食大は腐食小の4倍の積算電流量となっている。

(2) 載荷

載荷実施の状況を図－4に示す。試験体上部には土被り厚さ 3.2m 相当のインゴットを載せる。試験体側部には静止側方土圧相当の荷重をPC鋼棒により載荷する。底面は完全固定条件となるように、PC鋼棒で固定する。地震時における地盤のせん断変形を想定し、油圧アクチュエーターを用いて試験体頂版中央の水平変位を変形角 1/1000 ピッチで変位制御により正負漸増載荷を行った。



図－3 電食の実施状況(区間Ⅰ)



図－4 載荷方法

3. 実験結果および考察

3.1 電食結果

(1) 腐食状況

載荷実施後に、試験体を解体して、腐食鉄筋を採取し、鉄筋の腐食状況を確認した。腐食小の SIN 試験体では、全体に表面的な腐食が生じ浅い孔食などの軽微な腐食が局所的に認められた。腐食大の LIN 試験体については、断面欠損の明らかな腐食が認められた。スリットがある L2A 試験体は、スリットの影響で局所的に著しく腐食していた。なお、試験体内部に発生していたひびわれに錆汁が付着しているのが確認された。これは、試験体内部に発生していた腐食ひびわれにも錆が広がっていたことを示している。

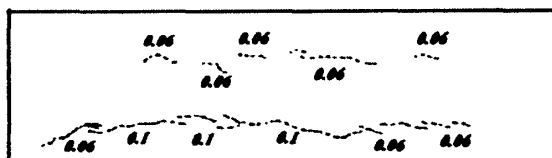
区間 I における試験体内側の電食後のひびわれ状況を図-5に示す。主筋の配置方向に沿った複数のひびわれが観察された。ひびわれ本数が主筋の本数よりも少ないのは、主筋の配置間隔とかぶり厚さの関係が影響しており、試験体内部の主筋間に腐食ひびわれが生じたことより、表面へのひびわれが生じにくくなったためであると考えられる。

(2) 鉄筋腐食量

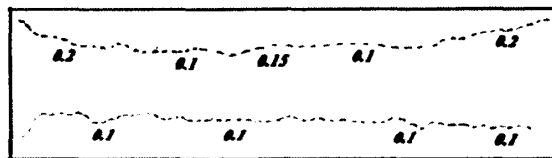
鉄筋の腐食量は、同一試験片に対して、質量差に基づく方法と、強度差に基づく方法の2通りの方法で求めた。質量差に基づく方法は、『コンクリート構造物の腐食・防食に関する実験方法ならびに規準(案)』⁹⁾に基づいて計測した。強度差に基づく方法は、電食した鉄筋の引張試験を実施し、電食していない鉄筋の引張荷重との差から鉄筋の断面積の減少率を同定し、これを腐食量とした。質量差に基づく方法はある区間の平均的な値であるのに対して、強度差に基づく方法はある区間における腐食量の最大値に対応する値になる。

図-6には、鉄筋腐食量と諸特性の関係を示した。図-6(a)では、腐食量の増加に従って、ひびわれ幅が増加している傾向が認められる。腐食量(強度差)と最大ひびわれ幅には概ね比例関係が認められる。図-6(b)より、主筋の質量差と強度差それぞれに基づく腐食量には、概ね線形関係が見られる。今回の実験の範囲では、質量差の腐食量に対して強度差の腐食量は、1.4倍となった。ただし、スリットがある場合については、局所的な腐食が進行して、質量差に基づく平均腐食量よりも、強度差に基づく最大腐食量はかなり大きくなった。また、図-6(c)からは、腐食量(強度差)と鉄筋の伸びには、反比例的な関係にあることが分かる。これは、鉄筋は均一に腐食しないため、腐食が激しい箇所では引張破断してしまう傾向があるためと考えられる。このため、鉄筋の伸びに対しては、質量差ではなく強度差の腐食量との相関が良かった。

図中の数値はひびわれ幅 [単位: mm]

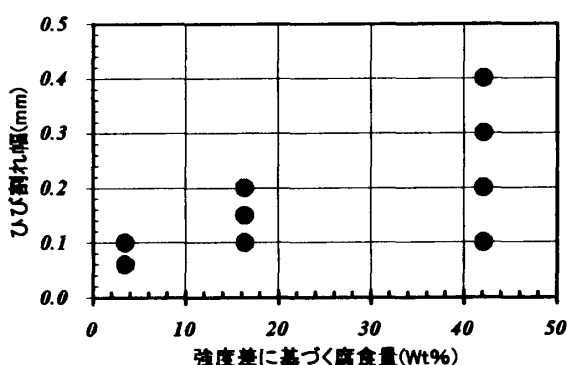


(a) 腐食小(SIN 試験体)

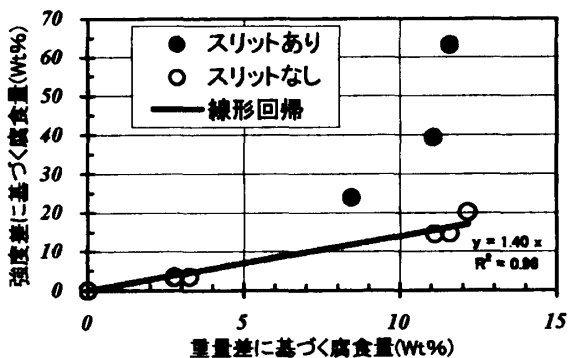


(b) 腐食大(LIN 試験体)

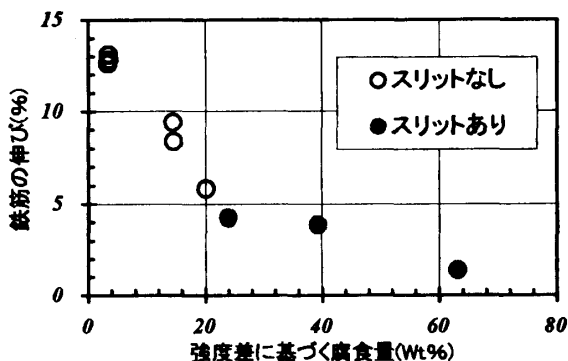
図-5 電食後のひびわれ状況



(a) ひびわれ幅と腐食量の関係



(b) 質量差と強度差それぞれに基づく腐食量の関係



(c) 腐食量と伸びの関係

図-6 鉄筋腐食量と諸特性の関係

3.2 載荷結果

(1) NNN 試験体

NNN 試験体の載荷結果を図-7に示す。最大荷重前から隅角部に微細なひびわれが発生し、最大荷重後に側壁下端のハンチ上側から底版部にかけての斜めひびわれが発生した。これは、応力の流れからこの部位にひびわれが入りやすいためと考えられる。そして、両側の側壁下端の隅角部において、斜めひびわれが発生した後、最初に発生した斜めひびわれのひびわれ幅が拡大し、荷重が低下した。しかしながら、損傷が進展しても急激に荷重低下することではなく、内空空間を確保していた。

なお、最大荷重前には、鉄筋降伏を確認することは出来なかった。これは、以降の全試験体に共通していた。

(2) SIN 試験体

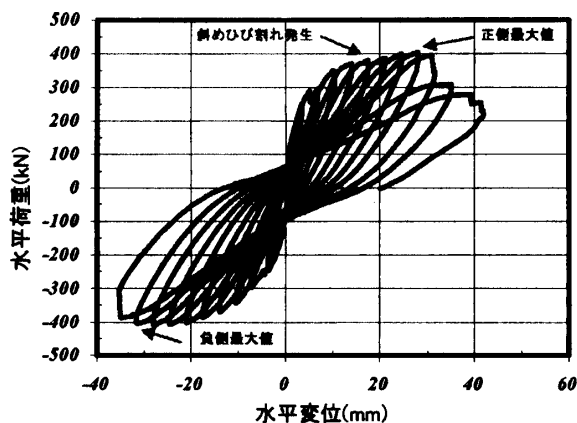
SIN 試験体の載荷結果を図-8に示す。荷重-変位関係については、正側と負側で最大荷重値が異なる結果となった。これは、鉄筋腐食させたのが試験体の一部分であるため、影響度合いが異なったためと考えられる。載荷前に観察された腐食ひび割れは試験体内側のみであったが、電食結果における腐食状況の確認より、試験体内部では奥行き方向の腐食ひびわれもある程度発生していたものと推察された。内面にも腐食ひび割れが鉄筋腐食した部位については、載荷時に入ったひびわれが腐食によって生じたひび割れと結合することによって、荷重が低下したものと考えられる。TOONGOENTHONGら⁵⁾は、斜めひびわれを誘発するようひびわれがある場合には耐力が低下し、逆に斜めひびわれの発生を疎外するような直交方向のひびわれがある場合には耐力が増加する場合があることを報告している。

(3) LIN 試験体

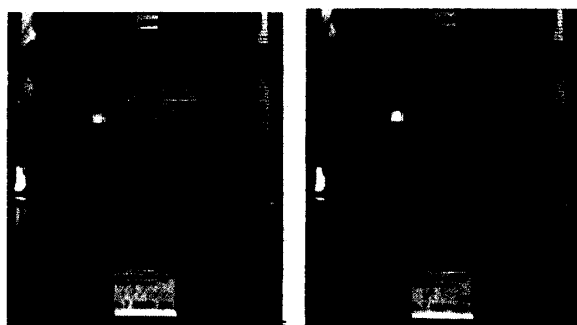
LIN 試験体の載荷結果を図-9に示す。ひびわれ状況としては、電食で生じた腐食ひびわれのひび割れ幅が繰り返し載荷の過程において大きくなる傾向にあった。しかし、主筋の平均腐食量が10%程度の大きな腐食程度でも、腐食がない場合と比較して、最大荷重はあまり低下しなかった。これは、構造物が不静定構造であるため、静定構造と比べて、局所的な材料劣化の影響を受けにくかったためと考えられる。

(4) L2A 試験体

L2A 試験体の載荷結果を図-10に示す。スリットの影響で著しく鉄筋腐食していたため、腐食部位に斜めひびわれが発生することにより、相対的に変形の小さい段階で、最大荷重を示した。この数値は他の試験体よりも小さい。しかし、その後の繰り返し載荷では、腐食していない側壁が最終的な破壊位置となった。これは、腐食した側壁の部材剛性が先行して低下した結果、剛性の高い側壁に損傷が集中したためと考えられる。

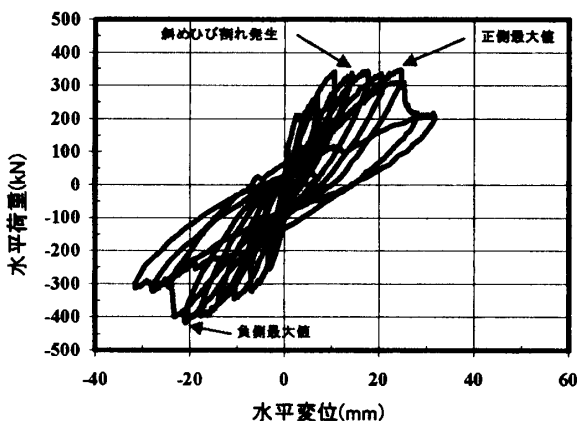


(a) 水平荷重-水平変位関係

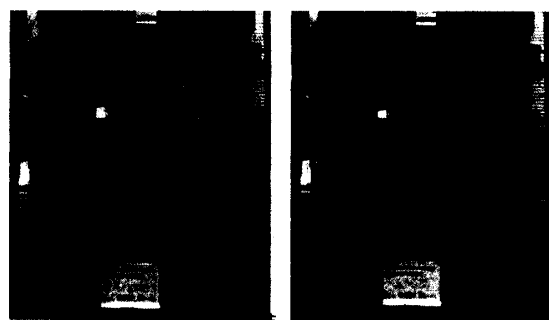


(b) 試験体の損傷状況

図-7 NNN 試験体の載荷結果

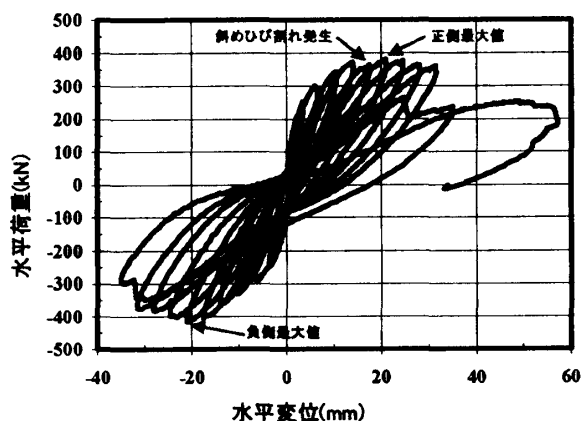


(a) 水平荷重-水平変位関係

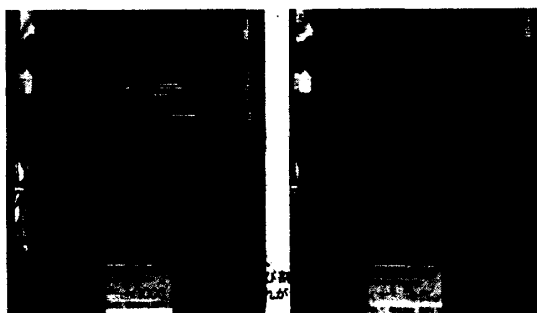


(b) 試験体の損傷状況

図-8 SIN 試験体の載荷結果

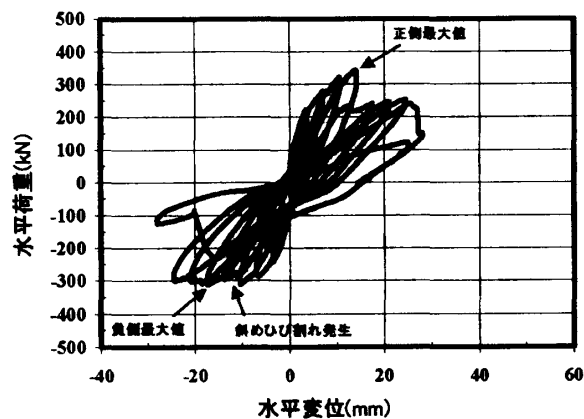


(a) 水平荷重—水平変位関係

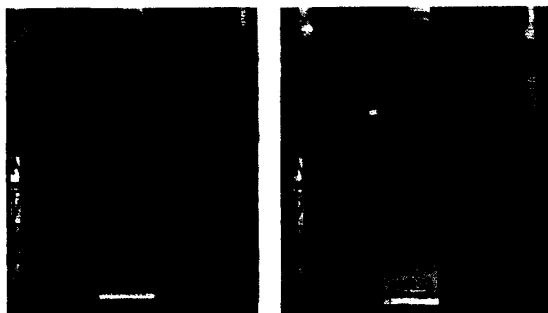


(b) 試験体の損傷状況

図-9 LIN試験体の載荷結果



(a) 水平荷重—水平変位関係



(b) 試験体の損傷状況

図-10 L2A試験体の載荷結果

3.3 せん断耐力に与える鉄筋腐食の影響評価

(1) 劣化進行過程における劣化程度との対応付け

実験結果を踏まえて、各試験体の劣化状況を図-11に示すように塩害環境下における一般的なRC構造物の劣化進行過程⁶⁾と対応付けた。腐食がないNNN試験体は、潜伏期である。腐食小のS1N試験体は、主筋に沿ってひびわれが発生した段階であり、鉄筋の腐食量が3%程度であることから、加速期前期とみなした。スリットがあるL2A試験体は、局所的な鉄筋腐食が著しく、耐力も低下していることから、劣化期に位置づけた。腐食大のLIN試験体については、観察された腐食ひび割れ幅は大きくないが、錆汁が析出しており、鉄筋腐食量が10%程度であることから、概ね加速期後期に対応すると判断した。

(2) 実験結果の比較検討

鉄筋腐食程度にかかわらず、全ての試験体がせん断破壊モードで破壊した。劣化進行過程における劣化程度に対応付けた各試験体の主な特性値について、劣化がない場合と比較した低下割合を図-12に示す。

図-12(a)より、劣化が進展するに従って、変形角3/1000時点における剛性は若干低下する傾向にあるが、差異は小さかった。これより、最大荷重に達する前の変形角の小さい段階においては、鉄筋腐食が構造物の剛性に与える影響は軽微であるとみなせる。図-12(b)より、劣化期を除けば、最大荷重の低下割合は、比較的小さかった。加速期前期に位置づけたS1N試験体において、正側と負側で低下度合いが異なっているのは、前述したように腐食ひびわれの影響である。加速期後期に位置づけたLIN試験体では、主筋の平均腐食量が10%程度になっても、最大荷重の低下度合いは顕著ではない。これは、RCボックスカルバートのせん断耐力に対しては、鉄筋の断面減少自体の影響が小さかったためと考えられる。また、劣化期に位置づけたL2A試験体については、局所的に最大50%以上の著しい腐食であったにもかかわらず、最大荷重の低下割合は2割程度であった。これらのことより、不静定構造では、劣化が局所的であれば、腐食量が大きい場合でも耐力の低下は顕著ではなく、腐食が進行しても静定構造のように耐力低下が生じにくいと考えられる。図-12(c)より、劣化が進展するに従って、最大荷重時の変位は低下する傾向が認められた。これより、鉄筋腐食が耐力性能に与える影響よりも、変形性能に与える影響の方が大きいと考えられる。これは、主に、腐食ひびわれの影響で、より変形の小さな段階で、斜めひびわれが誘発されやすくなるためであると考えられる。しかしながら、不静定の構造物では、応力の分散効果があるため、著しい劣化でなければ、耐力に対しては、局所的な材料劣化の影響を相対的に受けにくいと考えられる。

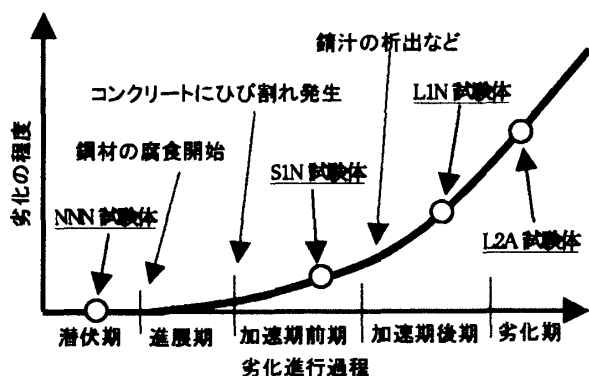
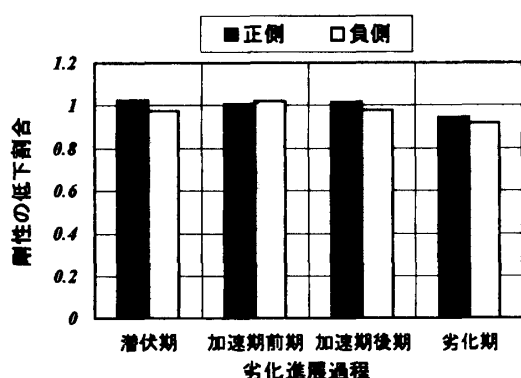
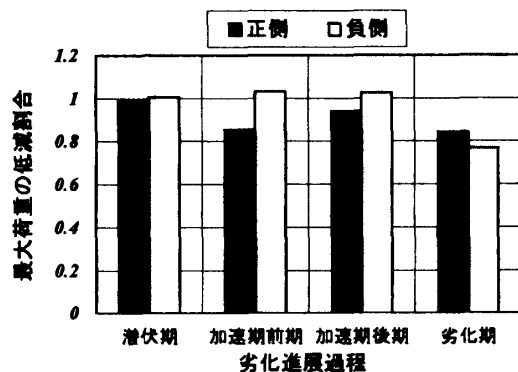


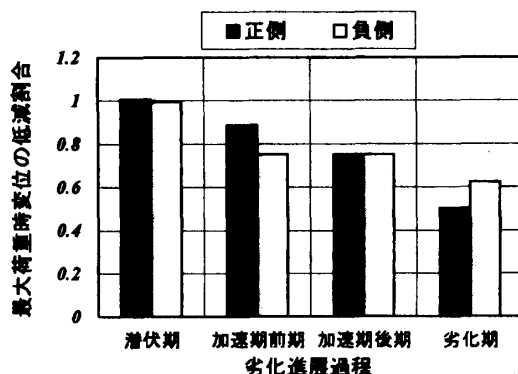
図-11 劣化進行過程⁶⁾における劣化程度との対応付け



(a) 変形角 3/1000 時点の剛性



(b) 最大荷重



(c) 最大荷重時の変位

図-12 主な特性値の低下割合

4. まとめ

本研究の範囲内で得られた主な成果をまとめると次のとおりである。

- (1) 電食結果より、予めスリットがあるような場合には、局所的に著しい腐食が生じることが分かった。鉄筋腐食量を求めるにあたっては、強度差に基づく方法など最大値に相当する腐食量についても考慮した方がよい。
- (2) 実験結果より、鉄筋腐食に伴って発生する腐食ひびわれがせん断耐荷機構に影響を与えることが分かった。すなわち、載荷前に試験体に内部に発生していた腐食ひび割れと載荷時に入ったひび割れが結合することによって、荷重低下する場合がある。
- (3) 実験結果より、主筋の平均腐食量が 10% 程度の大きな腐食程度でも、腐食がない場合と比較して、最大荷重の低下度合いは顕著ではなかった。これは、ボックスカルバートが不静定構造のため、局所的な劣化の影響を受けにくかったためと考えられる。
- (4) 一般的な RC 構造物の劣化進行過程における劣化程度と RC ボックスカルバートのせん断耐荷力の関係に対応付けて整理し、劣化が顕著でない範囲においては、剛性や最大荷重の低下は小さいものの、変形性能は劣化の進行とともに低下する傾向にあることを示した。

参考文献

- 1) 土木学会：材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能，コンクリート技術シリーズ，No. 71，2006。
- 2) 松尾豊史，松村卓郎，遠藤達巳，金津努，橋泰久：強制的に腐食させた鉄筋コンクリート製ボックスカルバートの載荷試験，土木学会第 56 回年次学術講演会，V-359，pp. 718-719，2003。
- 3) 土木学会原子力土木委員会：原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針，2005。
- 4) 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の腐食・防食に関する試験方法ならびに規準(案)，1987。
- 5) TOONGOENTHONG, K. and MAEKAWA, K. : Computational Performance Assessment of Damaged RC Members with Fractured Stirrups, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 3, No. 1, No. 123-136, 2005。
- 6) 土木学会：コンクリート標準示方書・維持管理編(平成 13 年度制定)，2001。

謝辞：本研究は電力 9 社と日本原子力発電，電源開発，日本原燃による電力共通研究として実施した。関係各位に謝意を表す次第である。