

論文 強制的に腐食させたRCボックスカルバートの載荷実験シミュレーション

松尾 豊史*1・松村 卓郎*1・遠藤 達巳*1・橘 泰久*2

要旨：本論文は，FEM解析における鉄筋腐食の考慮方法について検討し，電食により鉄筋を強制的に腐食させたRCボックスカルバートの載荷実験のシミュレーション解析を行ったものである。その結果，腐食による鉄筋の断面減少及びコンクリートと鉄筋界面の付着力の低下を適切に考慮すれば，全体的な荷重-変位関係は概ね良好にシミュレート出来ることが確認された。

キーワード：RCボックスカルバート，鉄筋腐食，構造性能，FEM解析

1. はじめに

現在，各機関で，性能設計体系への移行に対応する研究が精力的に進められている。一般に，コンクリート構造物の構造設計は，耐久性が確保されることを前提に行われる。しかし，供用期間中の経年劣化については，劣化の程度と構造性能の関係，劣化の進行と経過時間の関係などについて十分に明らかにされているとは言い難いため，安全側の設計にならざるを得ない。

今後，構造性能と耐久性の両者の統合評価を視野に入れた，より合理的な性能設計体系を構築していくためには，経年劣化と構造性能の関係を明らかにし，劣化を考慮した評価方法を構築していく必要がある¹⁾。

そこで，本論文では，鉄筋腐食が鉄筋コンクリートの構造性能に与える影響について明らかにするために，電食により強制的に腐食させたRCボックスカルバートの載荷実験を実施し，FEM解析における鉄筋腐食の考慮方法について検討した上で，鉄筋腐食したRCボックスカルバートの載荷実験のシミュレーション解析を実施したものである。

2. 強制的に腐食させたRCボックスカルバートの載荷実験

2.1 実験概要

(1) 試験体の仕様

実験で用いた試験体は，実際に13年間海水排水路として使用されてきた鉄筋コンクリート製地中ボックスカルバートである²⁾。試験体の形状と配筋を図-1に示す。構造物は，原位置における土被り厚さを約1m，水平震度を0.3として震度法により設計された外形幅2.1m，高さ2.7m，奥行き0.45mの一連ボックスカルバートである。なお，せん断補強筋は配置されていない。コンクリートコア及び鉄筋を採取して，コンクリートの圧縮試験及び鉄筋の引張試験を行った結果を表-1に示す。

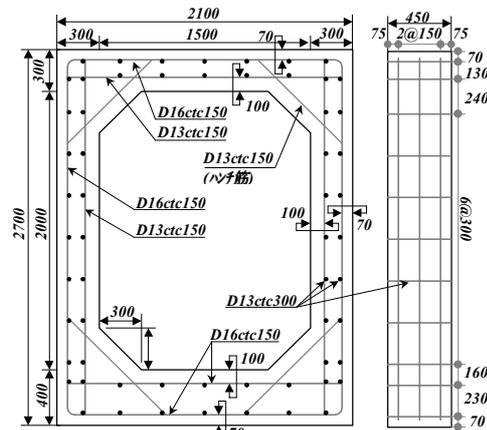


図-1 試験体の形状と寸法[単位:mm]

(2) 腐食方法

試験体の一部には，変色あるいは貝殻の付着があるものの，有意なひび割れや鉄筋の錆などは認められなかった。そこで，実際よりも劣化した状況を再現するために，電食試験を実施し

*1 (財)電力中央研究所我孫子研究所 材料構造部 (正会員)

*2 中部電力(株) 土木建築部 (非会員)

た。電食試験では、試験体の内外面のみが 3%NaCl 溶液に接するような容器を作成し、鉄筋をプラス(+)極、鋼製エキスパンドメタルをマイナス(-)極とし、直流電流 20A 一定で、約 16 日間通電した(図-2 参照)。

表-1 材料試験結果
(a) コンクリート ($f_{ck}=24$)

圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)	割裂引張強度 (N/mm ²)
31.5	3.29×10^4	2.68

(b) 鉄筋 (SD345)

降伏強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)	降伏ひずみ ($\times 10^{-6}$)
381	1.68×10^5	2273

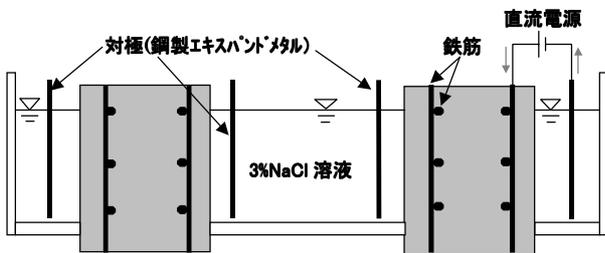


図-2 電食試験の状況

(3) 荷荷方法

荷荷方法の概略を図-3に示した。地震時に地盤から与えられるせん断変形を想定し、試験体両側に設置した油圧アクチュエーター2台を用いて変位制御で正負交番荷荷した。試験体上部には土被り厚さ 1m の上荷荷重を模擬して約 17kN のインゴットを載せた。底面は完全固定条件となるように、PC鋼棒で固定した。荷荷試験は交互に同一変位を正負2回づつ繰り返しながら順次漸増させていった。荷荷スケジュールを図-4に示す。

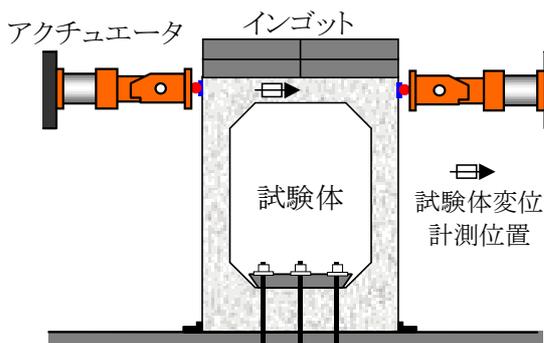


図-3 荷荷方法概略図

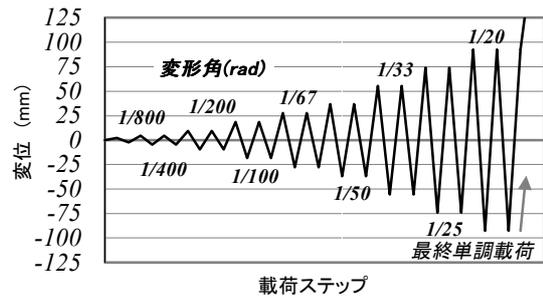


図-4 荷荷スケジュール

2.2 実験結果および考察

(1) 電食試験

通電後の試験体のひび割れ状況を図-5に示す。ひび割れは、外側鉄筋にそって多く生じた。外側鉄筋にそったひび割れが多いのは、内側よりもかぶり径が小さく、鉄筋径が大きいためと考えられる。

鉄筋の腐食量は、質量差に基づく方法と、強度差に基づく方法の二つの方法で求めた。質量差に基づく方法は、『コンクリート構造物の腐食・防食に関する試験方法ならびに規準(案)』³⁾に準拠して計測した。荷荷試験後に試験体を解体し、各部位ごとに長さ 10cm の鉄筋を数本ずつ切り出し、約 60℃ の 10% クエン酸二アンモニウム溶液に約 3 日間浸漬後、腐食生成物を除去して鉄筋の質量を測定し、電食していない鉄筋を同様に処理した後の質量との差を腐食量とした。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鉄筋降伏荷重との差から鉄筋の断面減少量を同定した。

表-2に示すように、計測手法および計測部位、鉄筋径で、かなり変動する傾向にあった。質量差から求める腐食量は、ある区間の平均的な腐食量であるのに対して、引張試験から求める腐食量はある区間における腐食量の最大値に対応すると考えられるため、強度差に基づく方法の方が腐食量を大きめに評価している。目視では、外部にひび割れが発生している外側鉄筋の方が腐食していたが、計測結果もそれに対応している。今回の検討では、両手法の平均値の約 8% をこの試験体全体の平均的な腐食量と考えることとした。

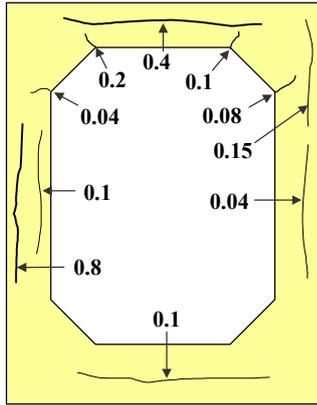


図-5 通電後のひび割れ状況[単位:mm]

表-2 腐食量の測定結果

(a) 質量差に基づく方法

	外側鉄筋 (%)	内側鉄筋 (%)	平均 (%)
右側壁	9.09	2.19	5.64
左側壁	4.56	3.82	4.19
平均	6.83	3.01	4.92

(b) 強度差に基づく方法

	外側鉄筋 (%)	内側鉄筋 (%)	平均 (%)
右側壁	15.7	9.43	12.6
左側壁	11.9	7.05	9.48
平均	13.8	8.24	11.0

(2) 載荷試験

図-6に、電食により強制的に腐食させた試験体の荷重とせん断変形角の関係を示した。なお、試験体に作用する荷重は、別途実施した電食していない健全な試験体²⁾と比較をするために、試験体奥行き45cmを105cmに換算して示している。試験体はせん断変形角が約1%に達した時に、荷重は274kNで最大となり、繰り返し2回目のせん断変形角1%時に、左側壁中央の電食によるひび割れ幅が急増して、耐力低下した。その後せん断変形角2%時に、拡張した電食ひび割れ面がずれてコンクリート片が剥落した。最終的には右側壁上下部のせん断ひび割れが卓越する結果となった。図-7には電食試験体と健全試験体の荷重-変位曲線の比較を示した。今回の腐食レベルにおいては、電食試験体は健全試験体に比べて耐力が約30%程度低下し、最大荷重以降の耐力低下度も大きくなる結果となった。電食試験体の荷重

-変位曲線の履歴形状は健全試験体に比べてエネルギー吸収の少ない逆S字型になっており、鉄筋とコンクリートとの付着力がかなり低下していると考えられる。

図-8に電食試験体と健全試験体のひび割れの比較を示した。電食試験体のひび割れ状況は左右側壁でやや異なる結果となった。左側壁は、電食ひび割れが開いて、かぶりコンクリート部が荷重分担しない状態になっていると考えられる。右側壁については、健全試験体と類似したひび割れ性状となった。

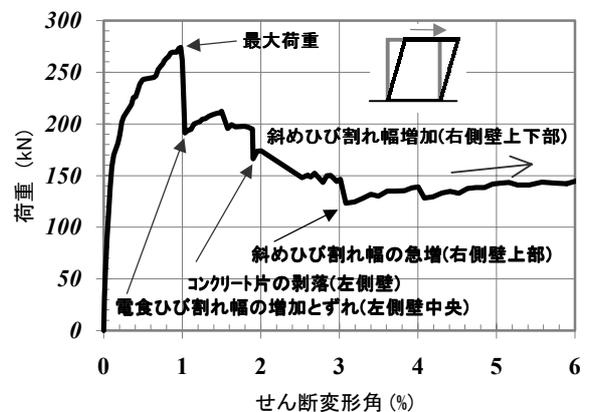


図-6 実験結果(荷重-変位関係)

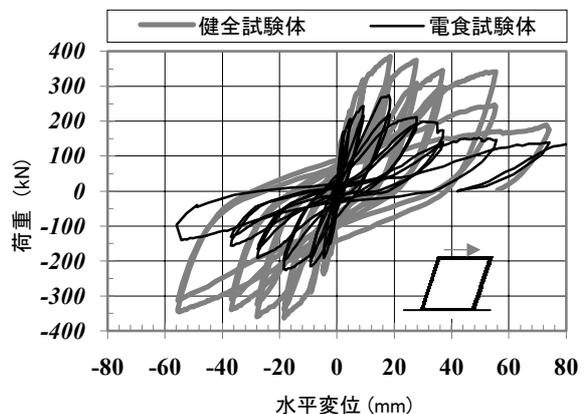
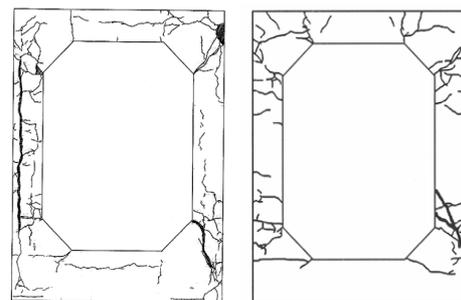


図-7 荷重-変位関係比較



(a) 電食試験体 (b) 健全試験体

図-8 ひび割れ図比較

3. シミュレーション解析

3.1 解析概要

解析は、鉄筋コンクリート要素として材料非線形を組み込んだ分散ひび割れモデルを用いた⁴⁾。解析コードは、東京大学の前川らにより開発された非線形FEMプログラム「WCOMD-SJ」(ver7.2)を使用した。鉄筋コンクリート要素モデルでは、コンクリートと鉄筋界面の付着は、式(1)に示すようにテンション・スティフニング効果として表わせる。付着パラメータ c は、鉄筋付着有効領域においては、異形鉄筋に対して推奨される 0.4 を、無筋部分ではひび割れ後の脆性的な挙動を表現するために 2.0 を用いる(図-9 参照)。

鉄筋腐食は、鉄筋の断面減少量に応じて、鉄筋量を低減することし、コンクリートと鉄筋界面の付着に関しては、付着パラメータ c の値を調整することにより考慮することとした。

$$\sigma_t = f_t \left(\frac{\varepsilon_{tu}}{\varepsilon_t} \right)^c \quad (1)$$

- f_t : コンクリートの引張強度
- σ_t : コンクリートの引張応力
- ε_{tu} : ひび割れ発生ひずみ
- ε_t : 引張ひずみ
- c : 付着パラメータ

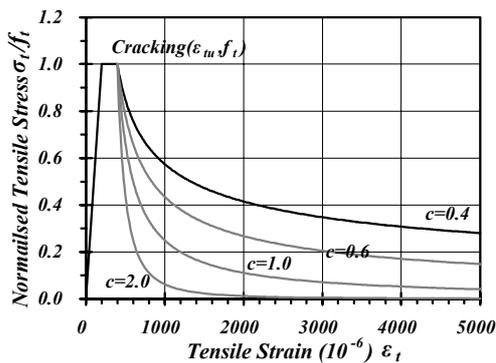


図-9 コンクリートの引張軟化モデル

3.2 付着パラメータの設定

別途実施した電食により鉄筋を腐食させたRCはり試験体の荷重試験⁵⁾を対象として、付着パラメータ c を設定するために解析的な検討を行った。RCはり試験体の仕様を図-10に、

解析要素分割を図-11に示す。鉄筋腐食量が既知の試験体に対して、付着パラメータ c を変化させたパラメータ解析を実施して、実験結果に最も近い付着パラメータ c を選定した。解析結果の一例を図-12に示す。これにより、解析において、腐食による鉄筋の断面減少とコンクリートと鉄筋界面の付着力の低下を適切に考慮すれば、鉄筋コンクリートはりの全体的な荷重-変位関係を概ねシミュレート可能であると考えられる。この結果を踏まえて、各腐食レベルにおいて考慮すべき付着パラメータ c の値を表-3のように設定した。

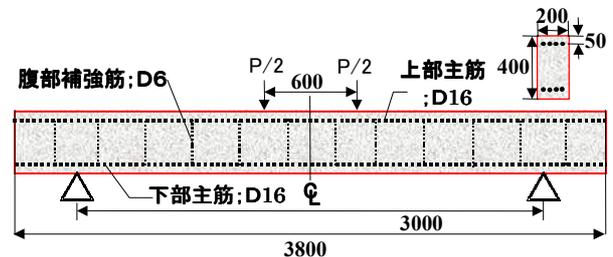


図-10 RCはり試験体の仕様[単位:mm]

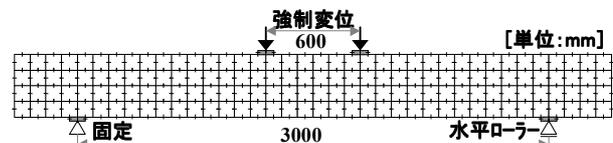


図-11 要素分割図(RCはり)

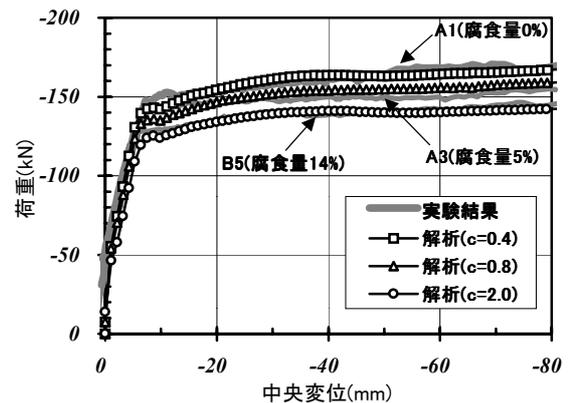


図-12 解析結果(RCはり)

表-3 鉄筋腐食量と付着パラメータの関係

鉄筋腐食量	付着パラメータ c
$\delta W \leq 2$ (%)	0.4
2 (%) $< \delta W \leq 5$ (%)	0.6
5 (%) $< \delta W \leq 8$ (%)	0.8
8 (%) $< \delta W \leq 10$ (%)	1.0
10 (%) $< \delta W$	2.0

3.3 解析結果

RCボックスカルバートの解析モデルを図-13に示す。解析では底面固定とし、頂版中央に強制変位を与えた。解析用入力物性は、表-4に示す。なお、試験体は13年間海水排水路として使用されてきたものであり、乾燥収縮などによると考えられる微細なひび割れが観察されたこと及び、予備解析における実験結果との初期剛性の一致度を考慮して、解析におけるコンクリートの引張強度については、割裂引張強度試験結果の50%の値を用いることとした。

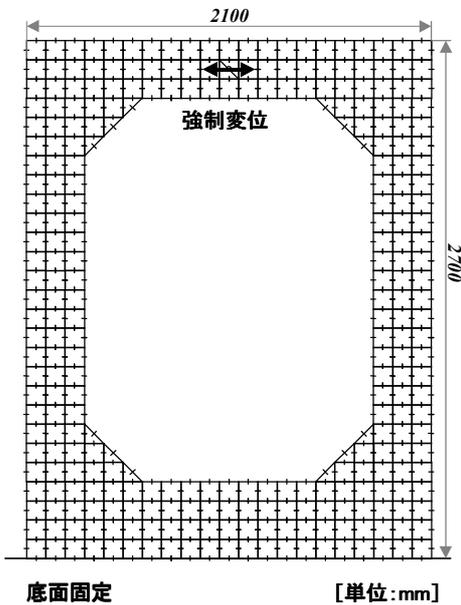


図-13 要素分割図(RCボックスカルバート)

表-4 解析用入力物性

コンクリート	圧縮強度 f_c (N/mm ²)	31.5
	ヤング係数 E_c (N/mm ²)	3.29×10^4
	引張強度 f_t (N/mm ²)	1.34
鉄筋	降伏強度 f_y (N/mm ²)	381
	ヤング係数 E_s (N/mm ²)	1.68×10^5

図-14は健全試験体の荷重-変位関係の実験結果と解析結果の比較である。健全試験体の全体的な荷重-変位関係については良好に一致し、ひび割れ状況についても実験結果と解析結果で概ね一致している(図-15参照)。

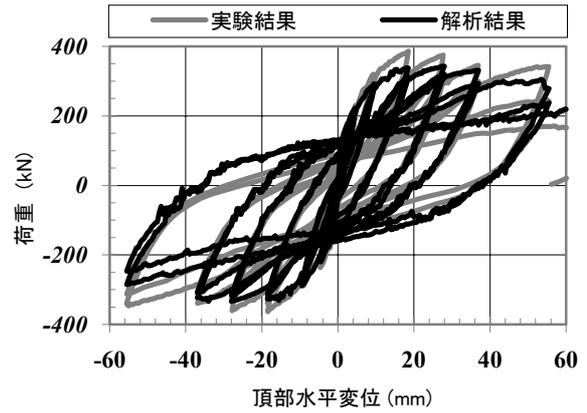


図-14 実験シミュレーション(健全試験体)

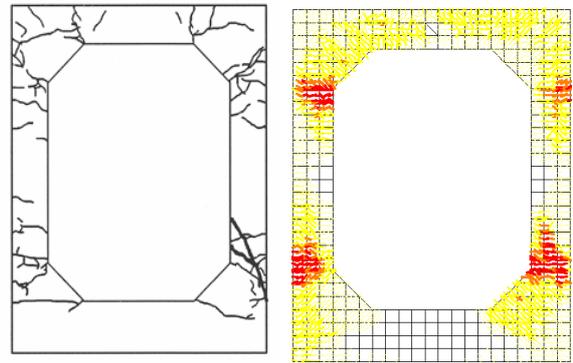


図-15 ひび割れ図比較(健全試験体)

試験体全体の平均的な鉄筋の断面減少量を8%と仮定し、付着パラメータ c については前述の検討結果に基づいて0.8を用い、電食により強制的に腐食させたRCボックスカルバートの荷重実験をシミュレートした。実験結果と解析結果の比較を図-16に示す。除荷勾配などにはやや差異は見られるものの、全体的な荷重と変位の関係については概ね再現しているものと考えられる。写真-1のように、電食試験体では側壁中央部のひび割れが開く状況にあったが、解析結果でも、側壁中央部でひび割れが多く発生しやすく、変形も大きくなっている(図-17参照)。

以上より、鉄筋の腐食量の計測方法や定量的評価方法については、さらに検討する必要があるが、腐食による鉄筋の断面減少およびコンクリートと鉄筋界面の付着力の低下を適切に考慮すれば、鉄筋腐食した鉄筋コンクリート構造物の全体的な荷重-変位関係については概ね良好にシミュレート可能であると考えられる。

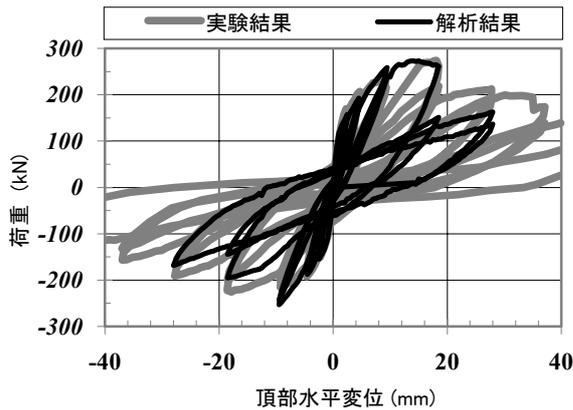


図-16 実験シミュレーション(電食試験体)

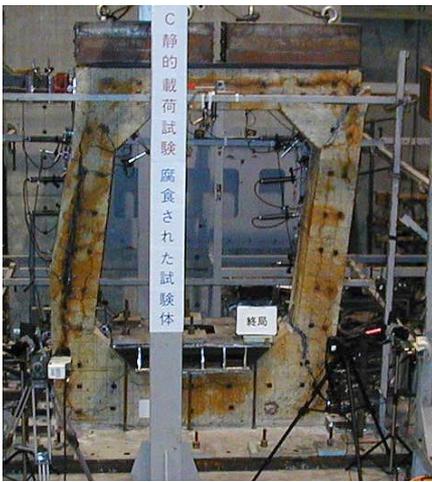


写真-1 電食試験体終局状況

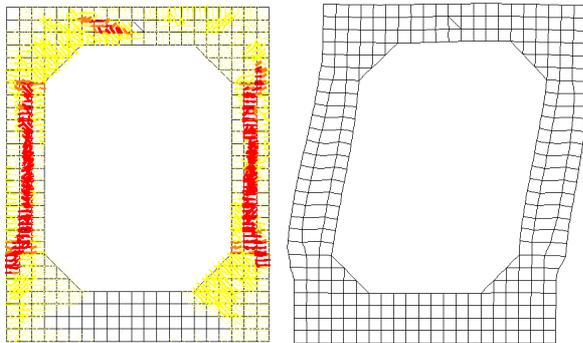


図-17 ひび割れ図及び変形図(電食試験体)

4. まとめ

本研究で得られた主な結果をまとめると次の通りである。

- (1) 試験体全体の平均的な鉄筋腐食量が約 8% 程度の腐食レベルである RC ボックスカルバート試験体は健全な場合に比べて耐力が 30% 程度低下し、最大荷重以降の荷重の低下度合いも大きくなる結果となった。また、

試験体の荷重-変位曲線の履歴形状は健全な試験体に比べてエネルギー吸収の少ない逆 S 字型になっており、コンクリートと鉄筋界面の付着力も低下する。

- (2) 腐食により主筋方向に生じたひび割れが大きくなると、かぶりコンクリート部が剥落しやすくなる。健全試験体では、隅角部の斜めひび割れが卓越する結果となったが、腐食が進行した部位では、腐食により初期に生じていたひび割れが開く傾向にあり、斜めひび割れは進展しにくくなる。
- (3) 電食により鉄筋を腐食させた RC はりの載荷実験に基づいたパラメータ解析結果から、鉄筋腐食量と付着パラメータ c の値を関連づけた。
- (4) RC ボックスカルバートの載荷実験のシミュレーション解析結果より、腐食による鉄筋の断面減少およびコンクリートと鉄筋界面の付着力の低下を適切に考慮すれば、鉄筋腐食した鉄筋コンクリート構造物の全体的な荷重-変位関係を概ね良好にシミュレート可能である。

参考文献

- 1) 土木学会・コンクリート委員会：コンクリート構造物の次世代設計法のゆくえ、全国大会研究討論会資料，1997
- 2) 平松住雄，橘泰久，秋山伸一，荒添正棋：実際に使用されてきた地中構造物を用いた地震時の耐力・変形性能に関する載荷試験，第 1 回構造物の破壊過程に基づく地震防災向上に関するシンポジウム，pp175-178，2000
- 3) 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
- 4) 岡村甫，前川宏一：鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則，技報堂出版，1991.5
- 5) 松尾豊史，松村卓郎，金津努，岡市明大：鉄筋腐食が正負交番載荷した RC はりの力学特性に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 23, No. 3, pp1321-1326，2001.7