

## (15) 塩害を受けたP C 橋梁の長期監視に関する 基礎的研究

建設省土木研究所	橋梁研究室	正会員	箕作	光一
建設省土木研究所	橋梁研究室		杉山	純
新構造技術株式会社	診断技術部	正会員	○松村	英樹
新構造技術株式会社	診断技術部		古沢	誠司

### 1. はじめに

わが国のP C 橋梁も建設されてからかなりの年数が経過してきたものが多くなり、塩害等により耐荷力や耐久性の低下が懸念されるものも現れてきている。特にP C 橋梁においては、P C 鋼材の腐食は耐荷力に大きな影響を与えるため、塩害等によりP C 鋼材の腐食が懸念される橋梁は、その腐食の進行状況を把握しておく必要がある。

現在、一般的にコンクリート中の鋼材腐食を感知する方法としては、次の二つの方法が用いられている。

①健全な鉄筋との電位差からの評価（自然電位法、分極抵抗法など）

②肉眼による錆汁の確認

しかし、上記の方法では測定の度に、現地に行き測定を行わなければならない、腐食の進行状況を長期的に監視するための測定には、適していない。

そこで今回、コンクリート内の鉄筋腐食の進行状況を把握するための方法として、鋼材が腐食する際の膨脹圧に着目し、コンクリート面のひずみおよび鋼材のひずみを測定し、その値の変化から鉄筋腐食の進行状況を把握する方法の有効性の検討を行った。

以下に、今回得られた結果を述べる。

### 2. 実験概要

#### 2. 1 供試体の形状寸法

供試体は、図1に示すように断面 $30 \times 30$  cm、長さ640 cmであり、主鉄筋には、D10（SD30）を使用した複鉄筋正方形断面RC梁である。なお、帯鉄筋を道路橋示方書（昭和53年）の最小間隔である20 cm間隔で配筋を行った。また、腐食の進行を速めるためにコンクリート中に $5 \text{ kg/m}^3$ の $\text{NaCl}$ を混入した。表1に、使用したコンクリート強度を表2に鉄筋強度を示す。供試体は、A、B2体作製し、同一の実験を行った。

#### 2. 2 実験方法

実験は、図2に示す上側5本の鉄筋の内（実験の都合上、鉄筋を配置した側を上にして実験を行った）3本の鉄筋について強制的に腐食を行った。その方法としては、供試体上面に鉄板（厚さ2 mm、幅150 mm）をバックフィル剤を介して取り付け、鉄筋1本に350 mAの直流電流を流して、電気腐食を行った。

表 1 コンクリート強度

供 試 体 名	A	B
コンクリート 圧縮	34.6	34.6
強度 (kg/cm <sup>2</sup> ) 割裂	27.2	27.2
弾性係数 (kg/cm <sup>2</sup> )	$2.64 \times 10^5$	$2.64 \times 10^5$

表 2 鉄筋強度

品名	規格	SD30		SD30(*)	
		D10	D13	D10	D13
公称直径 (mm)		9.53	12.7	9.53	12.7
公称断面積 (cm <sup>2</sup> )		0.7133	1.267	0.7133	1.267
降伏点応力度 (kg/cm <sup>2</sup> )		3.682	3.507	3.734	3.480
引張り強さ (kg/cm <sup>2</sup> )		5.019	5.119	5.070	5.138
伸び率 (%)		29.4	30.4	30.3	30.4
弾性係数 (kg/cm <sup>2</sup> )		$2.1 \times 10^6$	$2.1 \times 10^6$	$2.1 \times 10^6$	$2.1 \times 10^6$

\*エポキシ樹脂塗装鉄筋

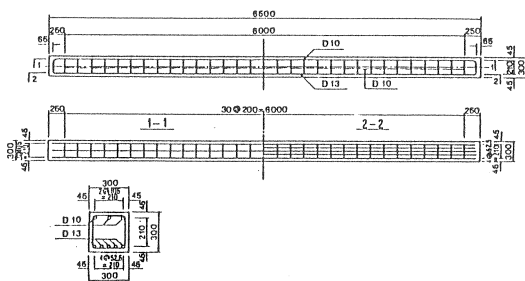


図 1 供試体形状寸法

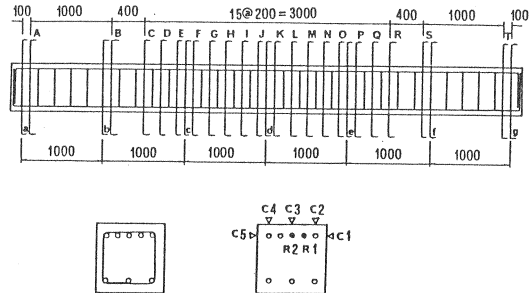


図 2 測定位置

### 2. 3 測定項目

測定は、図 2 に示す位置のコンクリートおよび鉄筋について、一日 2 回 12 時間間隔で行った。なお、測定中は測定値に与える影響を除くため、直流電流を停止した。

また、コンクリート面に貼付したコンクリートゲージは、供試体の長さ方向に対して直角に貼付し、コンクリート内部の鉄筋の膨脹による表面ひずみのみを検出できるようにした。また、腐食を生じさせない鉄筋については、エポキシコーティングを施して腐食を防いだ。

### 3. 実験結果

実験を行った結果について以下に述べる。なお、各図中の○-□-△は、測定項目を表し、最初の○は、供試体の名称（A, B の 2 種類）、次の□は、測定断面の位置（図 2 に示す測定断面位置）を表し、最後の△は、測定を行ったもの（コンクリートなら C, 鉄筋なら S）を示した。

#### 3. 1 コンクリートひずみ

縦軸にひずみを取り、横軸に電気腐食を始めてからの経過日数をとって、鉄筋が腐食していく過程におけるコンクリート表面のひずみの変化を図 3 に示す。

図中の C1 ~ C5 は、図 2 に示す測定位置を示している。なお、図中にコンクリートにひびわれが発生するひずみの理論値を示した。

これらの図より、A, B 供試体とも測定を行った断面において、供試体上面のひずみ量は電気腐食が進行するに従って引張ひずみが増加するが、供試体側面においては、圧縮ひずみが増加（A - b - C を除いて）して行き、供試体上面にひびわれが発生（肉眼で確認

した後、側面の圧縮ひずみが更に増加していく挙動を示した（A-b-Cについては、供試体側面C5側にひびわれが発生したため、C5と対であるC4の発生ひずみが圧縮側に増加した）。

### 3. 2 鉄筋ひずみ

縦軸にひずみを取り、横軸に電気腐食を始めてからの経過日数をとって、鉄筋が腐食していく過程における腐食を行った鉄筋および腐食を行わなかった鉄筋のひずみの変化を図4に示す。

これらの図より、腐食を行った鉄筋および腐食を行わなかった鉄筋ともひずみは、圧縮側に増加している（腐食を行った鉄筋で、実験中に測定不能になったものについては除く）

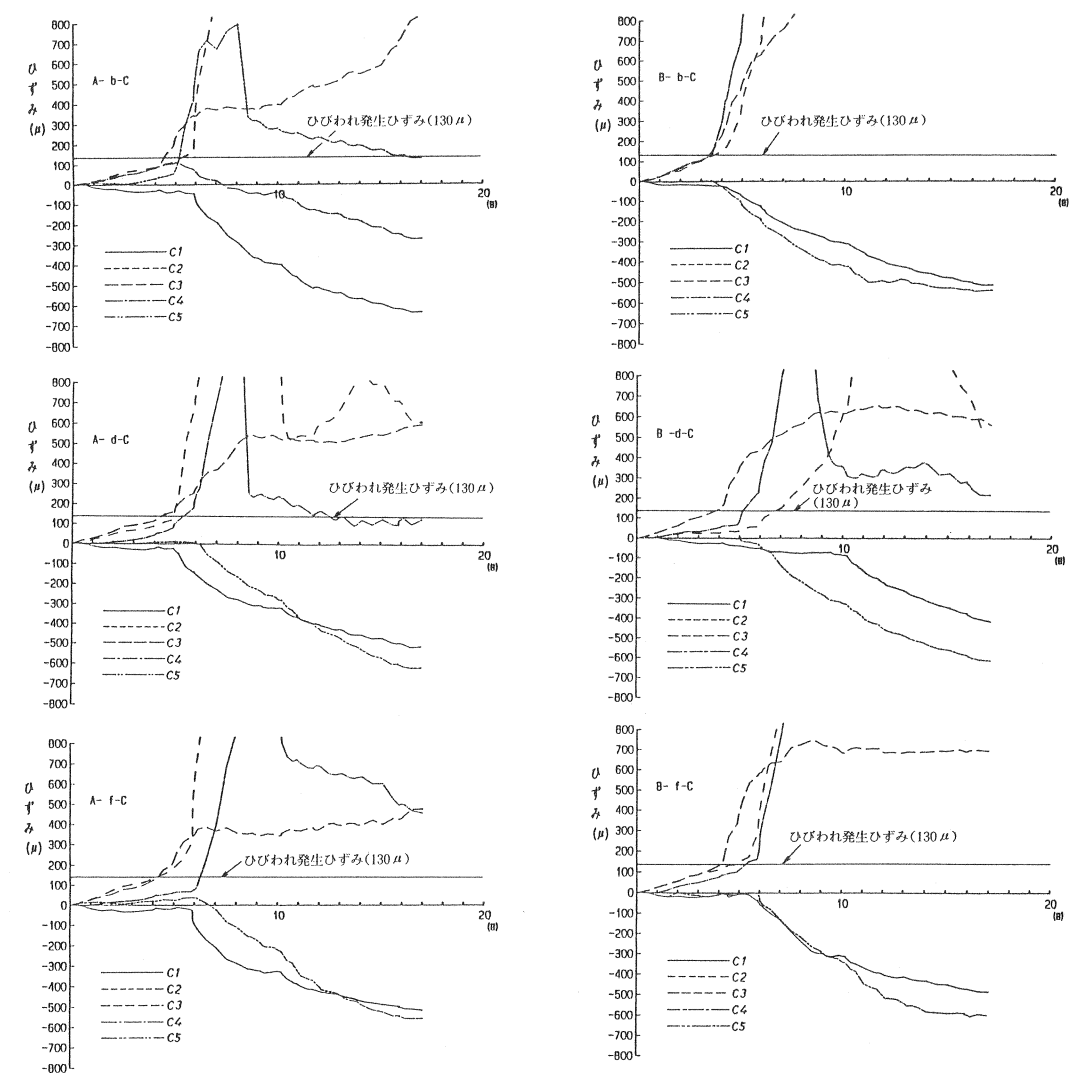


図3 コンクリートひずみの変化

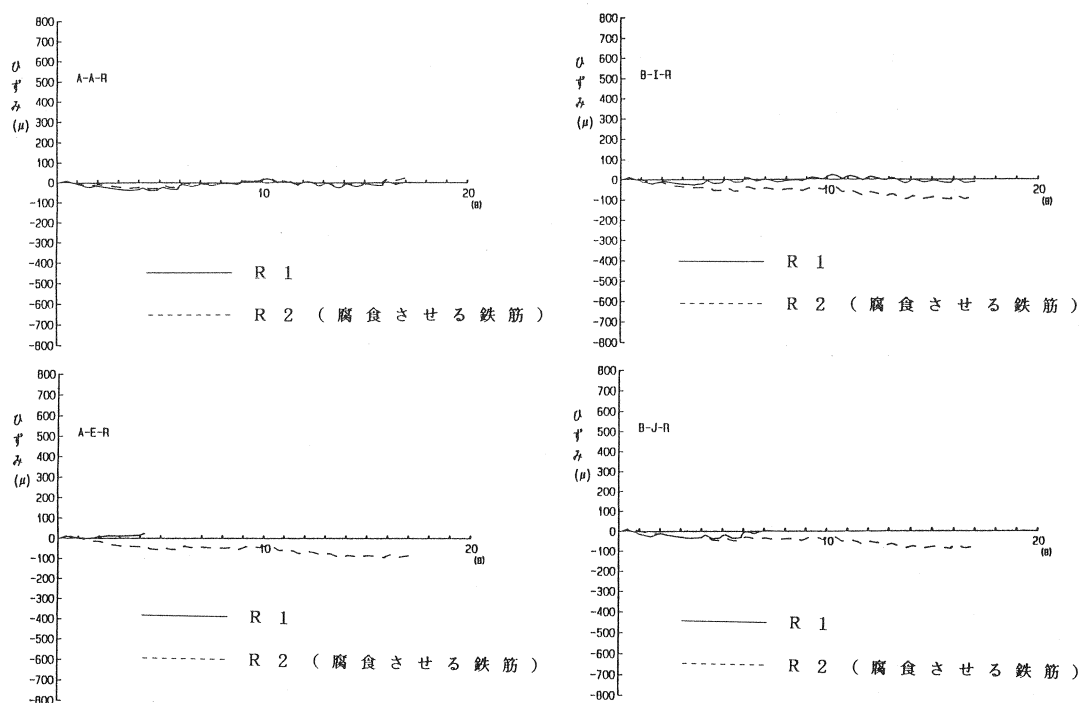


図 4 鉄筋ひずみの変化

### 3. 3 実験結果のまとめ

今回の供試体の上側の位置においては、鉄筋の腐食に伴って、引張ひずみが生じた。これは、コンクリート中の鉄筋が腐食することによって膨脹を起こし、その膨脹圧によってコンクリート表面に引張ひずみが生じたものと考えられる。また、供試体側面において鉄筋腐食に伴って圧縮ひずみが生じた。これは、今回の実験の場合、電極板と鉄筋の距離が近いために、鉄筋の表面が均一には腐食せず（実際の自然現象の腐食においても、かぶり厚さの違い等により、鋼材は均一には腐食は起こらない）、鉄筋の膨脹圧の差から、側面において圧縮ひずみが発生したものと考えられる。この結果より、鉄筋の腐食を鉄筋と直角方向に貼付したゲージから得られたコンクリートの表面ひずみの値から推定することが可能であると考えられる。

また、腐食を行った鉄筋および腐食を行わなかった鉄筋とも鉄筋の腐食に従って、発生ひずみは圧縮側に増加した。これは、鉄筋が腐食することによって、断面が減少するために、死荷重作用下におけるモーメントに対して、1本の鉄筋が負担する応力が増加するためであると考えられる。しかし、その増加量はわずかであり（腐食を行わない鉄筋において、17日経過時点で100 μ程度）、鉄筋ひずみの変化から鉄筋の腐食程度を推定することは困難であると考えられる。

### 4. 解析

コンクリート中の鉄筋は、腐食することによって膨脹を起こし、その膨脹圧によってコ

ンクリート表面には、引張ひずみが生じるものと考えられる。

コンクリートの引張ひずみの値は、コンクリート面にひびわれが発生するまで有効であるが、コンクリート面にひびわれが生じた後は、その値に信頼が置けず、その値からコンクリート中の鉄筋の腐食程度を監視するための測定値としては、適していない。一方、今回の実験結果のように鉄筋の腐食によってコンクリート表面に圧縮ひずみが発生するならば、コンクリート中の鉄筋の腐食程度を監視するための測定値として用いることが可能であると考えられる。そこで、ここでは、有限要素法により解析を行い理論的に、鉄筋が腐食する際に圧縮ひずみが発生することを確かめた。

#### 4. 1 解析モデル

実験を行った供試体の断面を図5(a)に示すモデルに置き換え、鉄筋が膨脹することによって生じる表面ひずみを求めた。なお、鉄筋の膨脹圧は、図5(b)に示すように鉄筋中心より上側にのみ作用させ、作用圧をコンクリート表面に近いほど大きくして解析を行った。

#### 4. 2 解析結果

図6に、鉄筋が腐食していく過程における、コンクリート表面の変形の状況を示す。なお、解析においては、鉄筋の腐食を膨脹力で置き換えているため、実験値との比較は行えなかった。

この結果、コンクリート中の鉄筋の腐食に従って（鉄筋の膨脹力が増す）、コンクリート表面にひずみが生じることが解る。また、今回のように鉄筋が、一様に腐食しない場合においては、腐食の進行が早い側のコンクリート表面においては、引張ひずみが生じるがその側面のコンクリート表面には圧縮ひずみが生じることが解析上明らかになった。

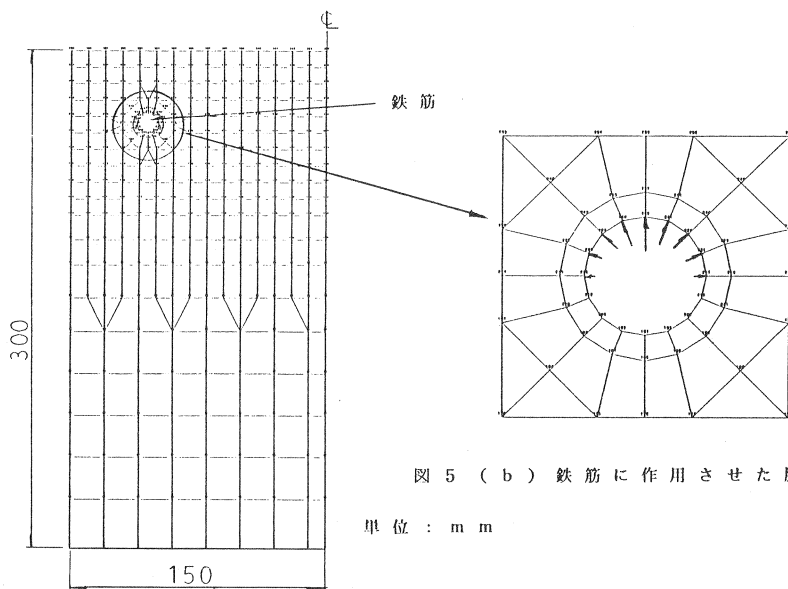


図5(b) 鉄筋に作用させた膨脹圧

単位：mm

図5(a) 解析モデル

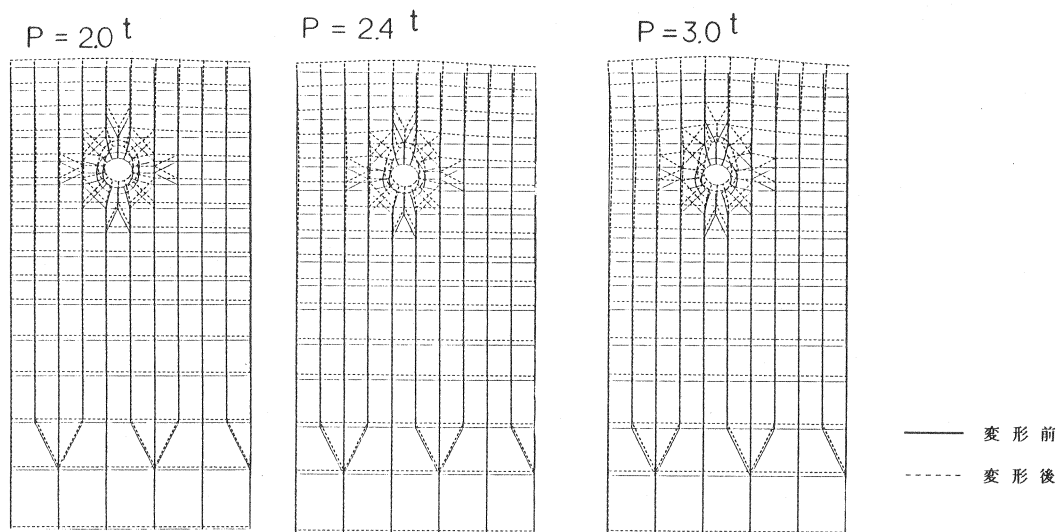


図 6 解析結果

## 5. まとめ

今回、塩害を受けたPC橋梁の長期監視に関する基礎的研究として、実験および解析を行った結果、次の事柄が明らかになった。

1. モデル供試体を作成し、強制的にコンクリート内部の鉄筋腐食を行った結果、コンクリート内部の鉄筋の腐食に従ってコンクリート表面にひずみが発生し、その値は鉄筋の腐食の進行によって増加した。従って、死荷重、活荷重の影響を除くため軸方向に直角にゲージを貼付し、コンクリート表面のひずみの測定値から、コンクリート中の鋼材腐食の進行を長期的に監視することができるものと考えられる。

2. 今回行った実験のように、鉄筋の表面が均一に腐食しない場合には、コンクリート表面の位置によって、引張ひずみが生じる位置と圧縮ひずみが生じる位置があることが解った。

3. 2. で得られた結果の理論的裏付けを行うために、有限要素法による解析を行ったその結果、鉄筋の表面が均一に腐食しない場合には、コンクリート表面の位置によって、引張ひずみが生じる位置と圧縮ひずみが生じることが確かめられた。

従って、引張ひずみよりも信頼性のある圧縮ひずみを用いてコンクリート中の鋼材腐食の進行状況を長期的に監視することが可能であると考えられる。

## 謝辞

本研究は、昭和62年度～平成元年度に行われた建設省官民連帯共同研究「橋梁の長期監視システムの開発（コンクリート橋部会）」の中で行われたものである。共同研究のメンバーである（株）東京測器研究所、東急建設（株）、（株）共和電業の各社ならびに実験を行っていただいた（株）フジケンエンジニアリングの各社に深謝いたします。