

京都大学 正員 岡田 清 京都大学 正員 小林和夫  
 京都大学 正員 宮川豊章 佐藤工業 正員 〇九畠 理  
 京都大学 正員 津田 章

1. まえがき 近年、川砂の不足による海砂の使用、あるいは海岸付近で海塩粒子の飛来を受けるような環境において、コンクリート構造物中の鉄筋に塩化物腐食が生じ、ひびわれが発生したり、かぶりコンクリートが剥落するという例が数多く報告されている。鉄筋腐食に起因する腐食膨張圧によりかぶり部に軸方向ひびわれが発生すると、部材の耐荷特性や破壊メカニズムが変化する可能性が高くなる。本研究では、まず両引供試体によって鉄筋腐食がコンクリートとの付着性能に与える影響を検討し、次いで、鉄筋方向のひびわれを有するはり供試体の耐荷特性と合成樹脂材料による補修効果を健全はりとの比較の上で検討した。

2. 実験概要 コンクリートの配合としては、比較的短期間に鉄筋腐食が進行し軸方向ひびわれが生じるように水セメント比を $a/d$ とし、スランパが $8 \pm 2\text{cm}$ となるように定めた。両引供試体としては、かぶり $2\text{cm}$ 、 $3\text{cm}$ の2種類とした(図1参照)。腐食供試体は、練り混ぜ水として $\text{NaCl}$  3.13%水溶液および水道水を用い、1日1.2回食塩水( $\text{NaCl}$  3.13%水溶液)を散水した。健全供試体の練り混ぜ水としては水道水を用い、散水は行わなかった。はり供試体は、全て $10 \times 20\text{cm}$ の複鉄筋対称断面とし、その4隅に $\text{D}10(\text{SD}35)$ の黒皮付異形丸棒をかぶり $2\text{cm}$ で配置した(図2参照)。また、「コンクリート構造物の限界状態設計法指針(案)」による最小量(2.3%)の矩形スターラップをせん断スパン内に一様に配置した。はり供試体の種類を表1に示す。腐食および補修はりは全て室内に静置し、1日1.2回食塩水( $\text{NaCl}$  3.13%水溶液)を散水した。軸方向ひびわれの発生後、補修はりについては現場における各種補修方法を参考に表1に示す3種類の補修を行い、腐食はりとは別に表1に示す載荷試験を行った。なお、載荷方法は図5に示す。

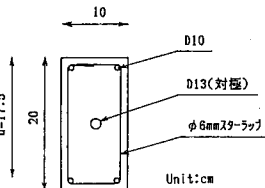


図2 はり供試体

3. 実験結果および考察 両引供試体は24週間散水を行ったが、軸方向ひびわれは発生しなかった。両引載荷試験時における荷重～ひずみ関係から図3のように見かけの剛性( $E_1, E_2$ )を定め、見かけの剛性より鉄筋の弾性係数 $\times$ 断面積を減じた値を付着効果を表す指標として表2に自然電位とともに示す。自然電位が卑なかぶり $2\text{cm}$ の場合には、健全供試体に比べて腐食供試体では付着効果が低下するが、かぶり $3\text{cm}$ の場合には付着効果の低下はさほど大きくはないことが認められる。したがって、軸方向ひびわれが発生していなくとも、自然電位がある程度卑( $-350\text{mV}$  vs  $\text{Ag}/\text{AgCl}$ 程度)となった場合には、鉄筋とコンクリートの間の付着が損傷されるものと考えられる。

はり供試体の軸方向ひびわれの発生状況を表3に、それらの載荷試験結果を表4に示す。なお、健全はりとは主鉄筋比が異なるため降伏荷重および最大荷重については、実験値と計算値の

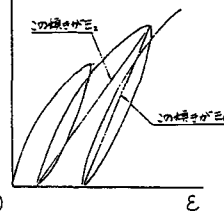


図3 見かけの剛性

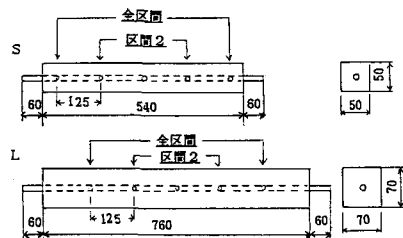


図1 両引供試体

表1 供試体一覧

| 供試体名  | 供試体長(cm)                                                                                                    | a/d                                                                          | 補修方法                                                                                                       | 載荷方法                                                                                             |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 健全供試体 | H-1 180<br>H-2 160<br>H-3 180<br>H-4 180<br>H-5 160<br>H-6 180<br>H-7 140<br>H-8 140<br>H-9 120<br>H-10 120 | 3.43<br>3.43<br>3.43<br>3.43<br>3.43<br>3.43<br>2.86<br>2.86<br>2.29<br>2.29 |                                                                                                            | 一方向繰返し<br>一方向繰返し<br>一方向繰返し<br>一方向繰返し<br>一方向繰返し<br>一方向繰返し<br>一方向繰返し<br>一方向繰返し<br>一方向繰返し<br>一方向繰返し |
| 腐食供試体 | C-1 180<br>C-2 180<br>C-3 180<br>C-4 180<br>C-5 160<br>C-6 180<br>C-7 140<br>C-8 140<br>C-9 120<br>C-10 120 | 3.43<br>3.43<br>3.43<br>3.43<br>3.43<br>3.43<br>2.86<br>2.86<br>2.29<br>2.29 |                                                                                                            | 一方向繰返し<br>一方向繰返し<br>一方向繰返し<br>一方向繰返し<br>一方向繰返し<br>一方向繰返し<br>一方向繰返し<br>一方向繰返し<br>一方向繰返し<br>一方向繰返し |
| 補修供試体 | R-1 180<br>R-2 180<br>R-3 180<br>R-4 180<br>R-5 160<br>R-6 180<br>R-7 140<br>R-8 140<br>R-9 120<br>R-10 120 | 3.43<br>3.43<br>3.43<br>3.43<br>3.43<br>3.43<br>2.86<br>2.86<br>2.29<br>2.29 | ライニングのみ<br>ライニングのみ<br>ライニングのみ<br>ライニングのみ<br>ライニングのみ<br>ライニングのみ<br>ライニングのみ<br>ライニングのみ<br>ライニングのみ<br>ライニングのみ | 一方向繰返し<br>一方向繰返し<br>一方向繰返し<br>一方向繰返し<br>一方向繰返し<br>一方向繰返し<br>一方向繰返し<br>一方向繰返し<br>一方向繰返し<br>一方向繰返し |

\* 曲げスパン: 20cm

比で表わした。一方、荷重～たわみ履歴曲線の包絡線から求めたじん性率を表5に示す。さらに、交番載荷下の荷重～たわみ履歴曲線の代表例を図4に示す。腐食はりでは、主鉄筋の付着強度の低下により曲げひびわれが最大曲げモーメント区間に集中するとともに、曲げ付着応力に起因する斜張力ひびわれが発生しにくいという特徴を有する。また多量のパッチングとライニングを併用すると(R-4.6)、ひびわれ分散性が極度に悪くなり、コンクリートの圧縮前に主鉄筋が破断し、脆性的な破壊が生じ易くなる傾向にある。腐食はりでは降伏耐力は低下しないが、最大曲げ耐力が若干

低下する。これに対して、パッチングによって補修した場合に降伏耐力は若干増加するが最大耐力はほとんど増加せず、さらにライニングを併用した場合に降伏耐力は著しく増大するものの、最大耐力は増大しない。

また、腐食はりに高応力の正負交番繰返し荷重が作用すると、健全はりに比べて繰返し回数の増大にともなう耐荷力の低下が大きくなる。補修はりでも同様の傾向がみられ、パッチングを多量に施すとその傾向はさらに顕著となった。図4より明らかなように、腐食はりやライニングのみの補修はりでは健全はりに比べて、正負交番載荷下でのピンチ効果が顕著となり、多量のパッチングを施した補修はりではきわめて剛性の高い特異な紡錘型ループを示す。また、腐食はり、補修はりのいずれ

表3 はり供試体ひびわれ発生状況 (最終結果)

| 供試体 No. | 数値日数<br>(週) | 主 鉄 筋 方 向 ひ び わ れ |     |     |     |                      |                           |                     |
|---------|-------------|-------------------|-----|-----|-----|----------------------|---------------------------|---------------------|
|         |             | ひびわれ本数            |     |     |     | 最大ひび<br>われ長さ<br>(mm) | 最大ひび<br>われ幅<br>( $\mu$ m) | 縦ひびわれ<br>長さ<br>(cm) |
|         |             | 上 下               | 曲 げ | 斜 張 | 合 計 |                      |                           |                     |
| C-1     | 21          | 0                 | 1   | 0   | 1   | 1.5                  | 0.02                      | 1.5                 |
|         | 22          | 7                 | 2   | 0   | 9   | 11.5                 | 0.10                      | 49.7                |
|         | 22          | 4                 | 1   | 0   | 5   | 16.3                 | 0.10                      | 37.1                |
|         | 22          | 2                 | 3   | 0   | 5   | 10                   | 0.08                      | 47.0                |
|         | 22          | 2                 | 0   | 0   | 2   | 11.0                 | 0.04                      | 43.5                |
|         | 22          | 6                 | 1   | 3   | 10  | 16.0                 | 0.15                      | 86.5                |
|         | 24          | 1                 | 1   | 1   | 3   | 7.5                  | 0.02                      | 11.0                |
|         | 24          | 0                 | 1   | 1   | 2   | 11.0                 | 0.10                      | 43.0                |
|         | 24          | 0                 | 3   | 0   | 3   | 9.5                  | 0.04                      | 19.0                |
|         | 24          | 2                 | 1   | 0   | 3   | 1.0                  | 0.04                      | 1.0                 |
| R-1     | 20          | 0                 | 3   | 0   | 3   | 5.0                  | 0.08                      | 10.0                |
|         | 20          | 0                 | 4   | 0   | 4   | 10.5                 | 0.15                      | 22.0                |
|         | 20          | 1                 | 0   | 0   | 1   | 4.0                  | 0.04                      | 4.0                 |
|         | 20          | 1                 | 1   | 0   | 2   | 4.0                  | 0.10                      | 7.0                 |
|         | 20          | 2                 | 0   | 0   | 2   | 4.0                  | 0.10                      | 7.0                 |
|         | 20          | 1                 | 0   | 0   | 1   | 8.7                  | 0.10                      | 8.7                 |
|         | 20          | 2                 | 1   | 1   | 4   | 9.0                  | 0.10                      | 17.5                |
|         | 20          | 0                 | 0   | 0   | 0   | —                    | —                         | —                   |
|         | 20          | 0                 | 0   | 0   | 0   | —                    | —                         | —                   |
|         | 20          | 1                 | 0   | 0   | 1   | 10.0                 | 0.15                      | 10.0                |

表2 見かけの付着効果

| 供試体名                        | 自然電位 | E <sub>1</sub><br>x10 <sup>3</sup> (kg) | E <sub>1</sub> -E <sub>2</sub><br>x10 <sup>3</sup> (kg) | E <sub>2</sub><br>x10 <sup>3</sup> (kg) | E <sub>2</sub> -E <sub>3</sub><br>x10 <sup>3</sup> (kg) |
|-----------------------------|------|-----------------------------------------|---------------------------------------------------------|-----------------------------------------|---------------------------------------------------------|
|                             |      |                                         |                                                         |                                         |                                                         |
| S-5                         | 2    | —                                       | 3.27                                                    | 1.84                                    | 4.89                                                    |
| 健全                          | 全    | —                                       | 3.94                                                    | 2.52                                    | 4.51                                                    |
| S-6                         | 2    | —                                       | 2.43                                                    | 1.00                                    | 2.40                                                    |
| 健全                          | 全    | —                                       | 3.78                                                    | 2.33                                    | 3.52                                                    |
| S-3                         | 2    | —                                       | 2.09                                                    | 0.68                                    | 1.98                                                    |
| 腐食<br>Cl <sup>-</sup> 無     | 全    | -427                                    | 2.22                                                    | 0.79                                    | 2.19                                                    |
| S-4                         | 2    | —                                       | 2.51                                                    | 1.09                                    | 2.39                                                    |
| 腐食<br>Cl <sup>-</sup> 有     | 全    | -452                                    | 2.29                                                    | 0.86                                    | 1.81                                                    |
| S-5                         | 2    | —                                       | 0.80                                                    | -0.52                                   | 0.81                                                    |
| 腐食<br>Cl <sup>-</sup> 3.13% | 全    | -243                                    | 1.09                                                    | -0.34                                   | 0.92                                                    |
| S-2                         | 2    | —                                       | 1.70                                                    | 0.27                                    | 1.80                                                    |
| 腐食<br>Cl <sup>-</sup> 3.13% | 全    | -287                                    | 1.59                                                    | 0.16                                    | 1.11                                                    |
| L-5                         | 2    | —                                       | -500.00                                                 | -501.43                                 | 6.76                                                    |
| 健全                          | 全    | —                                       | 3.91                                                    | 2.48                                    | 4.07                                                    |
| L-6                         | 2    | —                                       | 2.44                                                    | 1.02                                    | 2.49                                                    |
| 健全                          | 全    | —                                       | 2.38                                                    | 0.96                                    | 2.25                                                    |
| L-3                         | 2    | —                                       | 5.15                                                    | 3.72                                    | 3.15                                                    |
| 腐食<br>Cl <sup>-</sup> 無     | 全    | -280                                    | 2.82                                                    | 1.40                                    | 1.91                                                    |
| L-4                         | 2    | —                                       | 3.04                                                    | 1.61                                    | 2.31                                                    |
| 腐食<br>Cl <sup>-</sup> 有     | 全    | -276                                    | 2.70                                                    | 1.27                                    | 2.11                                                    |
| L-1                         | 2    | —                                       | 2.21                                                    | 0.79                                    | 1.51                                                    |
| 腐食<br>Cl <sup>-</sup> 3.13% | 全    | -236                                    | 3.38                                                    | 1.95                                    | 2.21                                                    |
| L-2                         | 2    | —                                       | 2.47                                                    | 1.05                                    | 1.68                                                    |
| 腐食<br>Cl <sup>-</sup> 3.13% | 全    | -202                                    | 2.60                                                    | 1.18                                    | 1.92                                                    |

E = 2.0 x 10<sup>8</sup> x 0.7133 kg

表4 はり供試体の載荷試験結果

| 供試体名 | 降伏荷重<br>(t)<br>(計算値) | 降伏荷重<br>(t)<br>(実験値) | 最大荷重<br>(t)<br>(計算値) | 最大荷重<br>(t)<br>(実験値) | 曲げひび<br>われ発生<br>荷重 (t) | 斜めひび<br>われ発生<br>荷重 (t) | 破 壊 状 況  | 上鉄筋とは数水上部割<br>下鉄筋とは数水下面割 |
|------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|------------------------|------------------------|----------|--------------------------|
|      |                      |                      |                      |                      |                        |                        |          |                          |
| 健 全  | H-1                  | 2.54                 | 3.20                 | 2.96                 | 3.81                   | 2.25                   | 曲げスパン圧壊  |                          |
|      | 2                    | 2.54                 | 3.45                 | 2.96                 | 3.87                   | 1.25                   | 曲げスパン圧壊  |                          |
|      | 3                    | 2.54                 | 3.40                 | 3.30                 | 3.75                   | 1.36                   | 曲げスパン圧壊  |                          |
|      | 4                    | 2.54                 | 3.25                 | 3.20                 | 3.70                   | 1.50                   | 曲げスパン圧壊  |                          |
|      | 5                    | 2.54                 | 3.50                 | 3.19                 | 3.65                   | 1.25                   | 3本コックリ   | 曲げスパン外割                  |
|      | 6                    | 2.54                 | 3.30                 | 3.20                 | 3.70                   | 1.00                   | 曲げスパン圧壊  |                          |
|      | 7                    | 3.04                 | 4.00                 | 3.55                 | 4.95                   | 1.64                   | 曲げスパン圧壊  |                          |
|      | 8                    | 3.04                 | 4.10                 | 3.55                 | 4.75                   | 1.50                   | 曲げスパン圧壊  |                          |
|      | 9                    | 3.80                 | 5.15                 | 4.44                 | 6.25                   | 1.50                   | 曲げスパン圧壊  |                          |
|      | 10                   | 3.80                 | 5.15                 | 4.44                 | 6.05                   | 1.50                   | 曲げスパン圧壊  |                          |
| 腐 食  | C-1                  | 3.18                 | 4.65                 | 4.30                 | 4.22                   | 4.80                   | 正負曲げスパン割 | 下1本上2本いずれも曲げスパン外で破断      |
|      | 2                    | 3.18                 | 4.50                 | 4.60                 | 4.22                   | 5.00                   | 正負曲げスパン割 | 上鉄筋1本破断                  |
|      | 3                    | 3.18                 | 4.60                 | 4.50                 | 4.22                   | 5.15                   | 正負曲げスパン割 | 正負曲げスパン外で破断              |
|      | 4                    | 3.18                 | 4.45                 | 4.05                 | 4.22                   | 5.05                   | 正負曲げスパン割 | 正負曲げスパン外で破断              |
|      | 5                    | 3.18                 | 4.70                 | 4.70                 | 4.22                   | 5.15                   | 正負曲げスパン割 | 正負曲げスパン外で破断              |
|      | 6                    | 3.18                 | 4.75                 | 4.90                 | 4.22                   | 5.10                   | 正負曲げスパン割 | 正負曲げスパン外で破断              |
|      | 7                    | 3.80                 | 5.35                 | 5.07                 | 5.07                   | 6.25                   | 正負曲げスパン割 | 正負曲げスパン外で破断              |
|      | 8                    | 3.80                 | 5.60                 | 5.07                 | 6.15                   | 2.50                   | 正負曲げスパン割 | 正負曲げスパン外で破断              |
|      | 9                    | 4.75                 | 7.45                 | 6.34                 | 8.05                   | 2.27                   | 正負曲げスパン割 | 正負曲げスパン外で破断              |
|      | 10                   | 4.75                 | 7.35                 | 6.34                 | 7.85                   | 1.64                   | 正負曲げスパン割 | 正負曲げスパン外で破断              |
| 補 修  | R-1                  | 3.16                 | 4.90                 | 4.45                 | 4.22                   | 4.90                   | 正負曲げスパン割 | 上鉄筋1本破断                  |
|      | 2                    | 3.16                 | 4.85                 | 4.50                 | 4.22                   | 5.10                   | 正負曲げスパン割 | 上鉄筋2本破断                  |
|      | 3                    | 3.16                 | 4.75                 | 4.75                 | 4.22                   | 5.50                   | 正負曲げスパン割 | 正負曲げスパン外で破断              |
|      | 4                    | 3.16                 | 4.75                 | 4.75                 | 4.22                   | 7.25                   | 正負曲げスパン割 | 正負曲げスパン外で破断              |
|      | 5                    | 3.16                 | 4.70                 | 4.20                 | 4.22                   | 5.10                   | 正負曲げスパン割 | 正負曲げスパン外で破断              |
|      | 6                    | 3.16                 | 4.55                 | 4.35                 | 4.22                   | 4.90                   | 正負曲げスパン割 | 正負曲げスパン外で破断              |
|      | 7                    | 3.80                 | 5.40                 | 5.07                 | 6.70                   | 3.00                   | 正負曲げスパン割 | 正負曲げスパン外で破断              |
|      | 8                    | 3.80                 | 5.30                 | 5.07                 | 6.45                   | 2.25                   | 正負曲げスパン割 | 正負曲げスパン外で破断              |
|      | 9                    | 4.75                 | 7.20                 | 6.34                 | 8.25                   | 7.40                   | 正負曲げスパン割 | 正負曲げスパン外で破断              |
|      | 10                   | 4.75                 | 7.20                 | 6.34                 | 8.15                   | 6.75                   | 正負曲げスパン割 | 正負曲げスパン外で破断              |

において静的新增型の荷重下では部材じん性は低下しないが、高応力の正負交番繰返し荷重作用下ではその低下が顕著である。

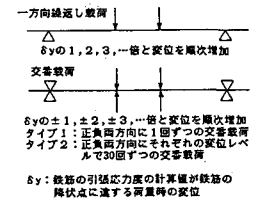


図5 載荷方法

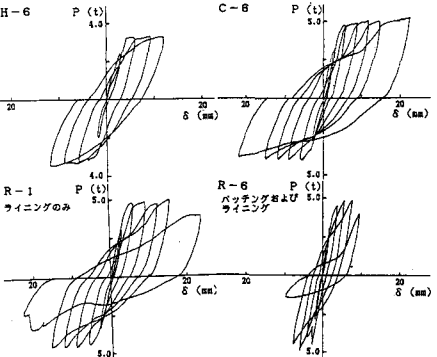


図4 載荷履歴曲線 交番載荷タイプ2

表5 降伏荷重、最大荷重 (実験値と計算値の比) じん性率

|         | 供試体名   | a/d  | 降伏荷重<br>実験値<br>計算値 | 最大荷重<br>実験値<br>計算値 | じん性率<br>μ |
|---------|--------|------|--------------------|--------------------|-----------|
|         |        |      |                    |                    |           |
| 方 向     | 健全 H-1 | —    | 1.31               | 1.30               | 4.89以上    |
|         | 腐食 C-3 | 3.43 | 1.46               | 1.22               | 10.15     |
|         | 補修 R-3 | —    | 1.50               | 1.51               | 13.90以上   |
|         | 健全 H-7 | —    | 1.34               | 1.37               | 7.12以上    |
|         | 腐食 C-7 | 2.88 | 1.44               | 1.22               | 5.32      |
|         | 補修 R-7 | —    | 1.41               | 1.30               | 12.31     |
|         | 健全 H-9 | —    | 1.36               | 1.39               | 8.67      |
|         | 腐食 C-9 | 2.29 | 1.25               | 1.26               | 9.10以上    |
|         | 補修 R-9 | —    | 1.89               | 1.30               | 11.84     |
|         | 健全 H-3 | 3.43 | 1.31               | 1.28               | 5.62以上    |
| 交 差 荷 重 | 腐食 C-4 | —    | 1.41               | 1.28               | 7.29以上    |
|         | 健全 H-5 | —    | 1.38               | 1.24               | 6.11以上    |
|         | 腐食 C-1 | 3.43 | 1.46               | 1.46               | 4.89      |
|         | 補修 R-1 | —    | 1.54               | 1.42               | 3.89      |
|         | 健全 H-6 | —    | 1.47               | 1.36               | 4.28      |
|         | 腐食 C-2 | —    | 1.46               | 1.46               | 4.89      |
|         | 補修 R-2 | —    | 1.54               | 1.42               | 3.89      |
|         | 健全 H-8 | —    | 1.38               | 1.24               | 6.11以上    |
|         | 腐食 C-6 | —    | 1.46               | 1.46               | 4.89      |
|         | 補修 R-6 | —    | 1.54               | 1.42               | 3.89      |