

論文 鉄筋腐食時の膨張圧による補修箇所のひび割れおよび剥離挙動

齊藤 準平^{*1}

要旨：再劣化による鉄筋腐食によって補修箇所に発生するひび割れや補修面の剥離の挙動を解明するため、断面修復工を施した供試体に対して、腐食膨張を静的破砕剤で模擬し破壊実験を行った。その結果、かぶりの方が鉄筋軸上ひび割れや剥離発生時の膨張圧が大きくなること、かぶり側半面腐食の場合が全面腐食の場合より鉄筋軸上ひび割れや剥離発生時の膨張圧が小さくなることわかった。また、補修した場合の補修面の付着強度が材料の引張強度より低い場合は健全な場合に比べひび割れや剥離のパターンが変わることや、早めに鉄筋軸上ひび割れや剥離を発生させることの要因となることがわかった。

キーワード：鉄筋腐食, 膨張圧, ひび割れ, 剥離

1. はじめに

近年、損傷・劣化したコンクリート構造物に対する補修・補強工事の増加に伴い、補修・補強後の構造物が劣化してしまう再劣化事例が増加している。損傷・劣化状況に応じて適切な工法や材料による補修・補強計画を要しても、補修後のコンクリート構造物を取り巻く環境や状況および構造物の状態の変化などにより、結果的に再劣化を生じてしまう可能性をいずれの補修後のコンクリート構造物は抱えているのが現状である。

断面修復工法において、再劣化に伴う鉄筋腐食による膨張に対する要求性能として、力学的性能、ひび割れ抵抗性および剥離抵抗性などがあり、それらを必要に応じて設定する必要がある^{1),2)}。しかし、補修後の再劣化による鉄筋腐食によるひび割れの発生および剥離においてはそのメカニズムが十分に解明されておらず、いくつかの要因が総合的に作用して発生するひび割れや剥離に対する要求性能の評価は十分でなく、適切な補修方法や補修材料の検討は難しいのが現状である。

本研究では、再劣化による鉄筋腐食が補修箇所に発生させるひび割れや剥離の挙動を解明することを目的とした。実験は、かぶりの条件を変化させ断面修復工を施した供試体に対して、堤ら³⁾が鉄筋の腐食膨張を静的破砕剤によって模擬した破壊実験方法を応用して行った。なお、本研究の実験条件の違いが結果に表れやすくなるために、実施工で行う鉄筋背面まではつりだしやウェッジの設置は行わず、補修面の剥離や補修部のひび割れが比較的容易に誘発される条件で実験を計画した。

2. かぶりの大きさとひび割れパターンおよび発生応力

図-1, 2 は、堤らの論文³⁾を参考に作成した、円孔内圧を受ける場合における弾性論から導いたひび割れパターンと応力状態の模式図(図-1)と、本研究の設定値における円孔周辺と表面部の応力(計算値)(図-2)である。堤らの研究結果をかぶりの大きさとの関係から整理

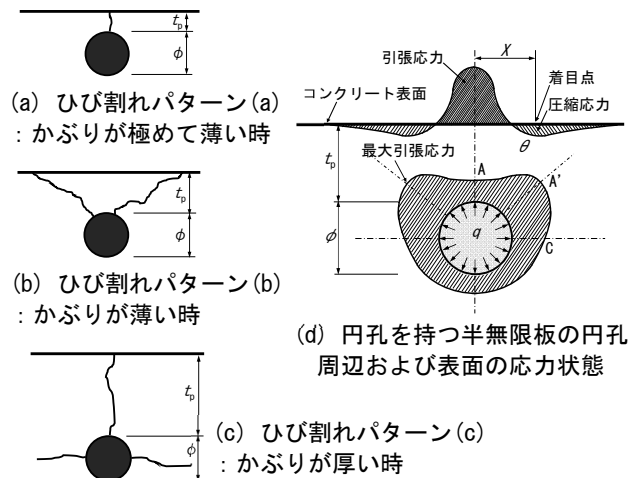


図-1 ひび割れパターンと応力状態(模式図) ³⁾を参考に作成

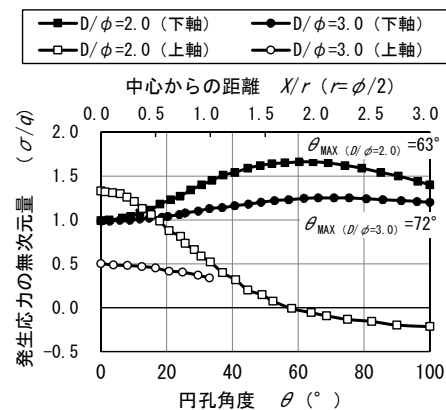


図-2 円孔周辺と表面の応力(計算値) ³⁾のグラフから作成

すると、かぶりが極めて薄い場合($D/\phi=1.5$ 以下)($D=2t_p + \phi$, t_p =かぶり, ϕ =鉄筋径)は、図(図-1(d))のように鉄筋上部のコンクリート表面で最大値を取り、鉄筋の腐食膨張圧によりかぶりコンクリートを押し広げるような力を受け、表面コンクリートからひび割れが発生する挙動(図-1(a))を示す。かぶりが薄い場合($D/\phi=1.5 \sim 3.0$)は、円孔周辺の引張応力が表面よりも大きくなり、かぶり直上から 60° 方向に応力が卓越する傾向となり、剥離(図-1(b))が発生する。かぶりが厚くなる(D/ϕ

^{*1} 日本大学 理工学部交通システム工学科准教授 博(工)(正会員)

=3.0 以上) と、最大値が卓越せず円周上に均等の応力状態となり、図-1(c)のようなひび割れパターンとなる。

3. 実験概要

3.1 供試体

表-1 に供試体一覧を、図-3 に代表的な供試体形状および実験状況を示す。表-2 に使用材料の力学的性質を、表-3 に補修箇所の寸法を示す。

供試体は膨張圧に対する補修の有無の挙動を比較するために、補修の無いタイプ N および NH と有るタイプ R および RH とした。補修部の形状は、かぶり直上と境界面との角度を 60° とした三角形とした。これは、堤らの弾性論による検討とモデル実験結果から、 $1.5 \leq D/\phi \leq 3.0$ の範囲ではかぶり直上から 60° 方向に応力が卓越する傾向が認められ剥離を生じやすいという結果(図-1(d))をもとに、最も剥離しやすい状況に設定するためである。かぶりはかぶりの相違の影響を比較するため2条件設定した。かぶりが小さく剥離(図-1(b))を生ずる可能性の高い 15mm ($D/\phi=2$) と、かぶりが大きく剥離または鉄筋周囲の均等の応力状態によって発生するひび割れ(図-1(c))のいずれかの可能性がある上記範囲の限界の 30mm ($D/\phi=3$) の2種類と決定した。

充填孔(円孔)は $\phi 30\text{mm}$ の鉄筋の使用を仮定し直径 30mm とした。また、腐食範囲は、かぶりが小さい時に見られる急速に十分な塩分が浸透し鉄筋全面が腐食すると想定したシリーズ A と、緩やかに塩分が浸透し鉄筋のかぶり側半分が腐食すると想定したシリーズ B の2種類とした。シリーズ B は、充填孔内の健全部側 ($90^\circ \sim 90^\circ$ の範囲) に塩ビ管を設置し、かぶり側半分にのみ膨張圧を受けるようにした。

供試体に使用した材料は、セメントモルタルとした。補修の有無の影響を比較すること、表面保護工法設計施工指針(案)²⁾による健全部と同等以上の力学的性能を有すことを踏まえて、健全部および補修部は同配合とした。なお、当該指針(案)²⁾によると、セメントモルタルはポリマーセメントモルタル、ポリマーモルタルに比べ、付着強度やひび割れ抵抗性がやや低くなるとされるが、補修面の剥離や補修部のひび割れが比較的容易に誘発されやすいことを狙った本研究の趣旨に合致する。セメントモルタルは、水セメント比 (W/C) =65%, 細骨材とセメントの容積比 (S/C) =450Vo1%とした。セメントには、早強ポルトランドセメント、細骨材は最大骨材寸法が 5mm 、表乾密度が 2.64g/cm^3 である。補修部に用いるセメントモルタルとしては一般の左官用の水結合剤比より大きくなるが、健全部の打設において、練り混ぜ後のセメントモルタルの円孔部周辺の隅部への流動を満たすために、当該水セメント比に決定した。

表-1 供試体一覧

タイプ	供試体名	補修状況	かぶり	腐食範囲	力学的性質
N	N-15	補修なし (健全)	15mm ($D/\phi=2.0$)	全面	シリーズA
	N-30		30mm ($D/\phi=3.0$)		
R	R-15	補修あり	15mm ($D/\phi=2.0$)	全面	シリーズA
	R-30		30mm ($D/\phi=3.0$)		
NH	NH-15	補修なし (健全)	15mm ($D/\phi=2.0$)	かぶり側 側面	シリーズB
	NH-30		30mm ($D/\phi=3.0$)		
RH	RH-15	補修あり	15mm ($D/\phi=2.0$)	かぶり側 側面	シリーズB
	RH-30		30mm ($D/\phi=3.0$)		

備考) $D=2t_p + \phi$, t_p =かぶり, ϕ =鉄筋径

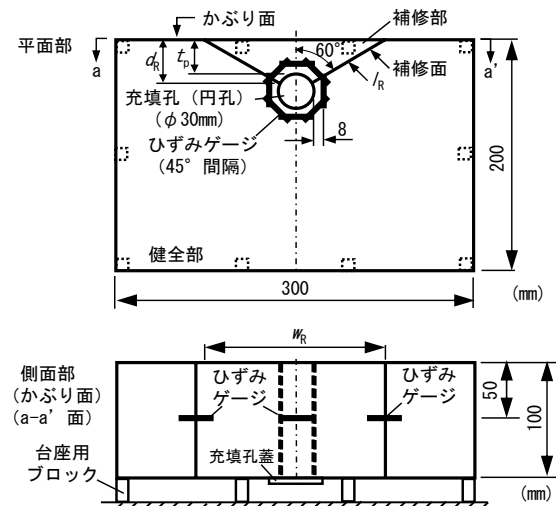


図-3 代表的な供試体形状および実験状況 (R-30)

表-2 使用材料の力学的性質

シリーズ	位置	圧縮強度 (N/mm^2)	引張強度 (N/mm^2)	ヤング係数 (kN/mm^2)
A	健全部	38.4	3.27	25.1
	補修部	36.3	3.08	25.4
B	健全部	40.3	3.92	25.5
	補修部	38.8	3.39	27.4

表-3 補修箇所の寸法

かぶり t_p (mm)	最大補修深さ d_R (mm)	かぶり面の 補修幅 W_R (mm)	境界部 斜距離 l_R (mm)
15	22.5	104	45
30	37.5	156	75

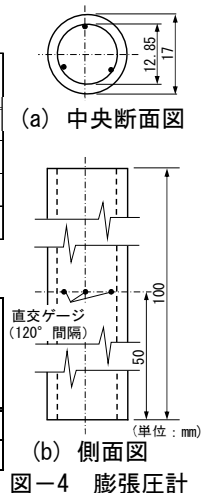


図-4 膨張圧計

供試体は、かぶり面が上面になるように型枠を作製し、健全部から打設した。その際、予め全供試体に充填孔、補修部がある場合はその部分に空間を設けた。補修部は、健全部が一定強度の発現まで養生後、健全部と補修部の境界面の処理をワイヤーブラシ、サンドペーパーを用いたレイタンスの除去および目粗しを行い、コンクリート表層部に十分吸水させた状態で左官工法により打設した。その際、健全部と同様に下向きに打設し、補修材の補修面との未付着を防ぎ、実験に影響が出ないようにした。

3.2 実験方法

図-4 に膨張圧計の寸法と直交ひずみゲージ3枚の配

置位置を示す。原田らの考案式(1)⁴⁾にひずみの平均値を用いて膨張圧は計算される。各記号は、 P :膨張圧(N/mm²)、 E_s :鋼管のヤング係数(=193kN/mm²)、 ν_s :鋼管のポアソン比(=0.3)、 k :鋼管の外内径比(外径/内径)(=1.285)、 ε_θ :鋼管円周方向ひずみ、 ε_z :鋼管軸方向ひずみである。

$$P = -\frac{E_s(k^2 - 1)}{2(1 - \nu_s^2)k^2}(\varepsilon_\theta + \nu_s \varepsilon_z) \quad (1)$$

実験は、実験前に充填孔内に膨張圧計を設置し、充填孔と膨張圧計の隙間空間(約48cm³)に静的破砕剤(シリーズA, B共に、質量比で静的破砕剤(粉体状)1に対し、水0.3を混合)を注入して、鉄筋腐食による膨張を再現した。ひずみは、充填孔の周囲には45°間隔に、かぶり面には中央および補修部と健全部の境界位置に貼り付けた。実験中は膨張圧とひずみを10秒ごとに計測した。

4. 実験結果

4.1 鉄筋軸上ひび割れおよび剥離発生時の膨張圧

図-5に鉄筋軸上ひび割れおよび剥離発生時の膨張圧を示す。図-6に鉄筋軸上ひび割れ発生時の膨張圧とかぶりの関係を、図-7に剥離発生時の膨張圧とかぶりの関係を示す。なお、N-30は剥離が発生しなかったため、そのデータは無い。

(1) かぶりの違いの影響

図によると、補修の有無や腐食範囲の違いに関わらず、かぶりの方が大きい方が鉄筋軸上ひび割れおよび剥離発生時の膨張圧が大きくなる傾向があることがわかる。

(2) 腐食範囲の違いの影響

図によると、補修の有無の違いに関わらず、半面腐食の場合が全面腐食の場合より、鉄筋軸上ひび割れおよび剥離発生時の膨張圧が小さくなる事がわかる。これは、かぶり側に局所的に腐食が生じた場合はその腐食量が少ない場合でもその腐食に伴う膨張圧によって、全面腐食の場合よりひび割れや剥離を発生しやすくすることを示唆するものである。

(3) 補修の有無の違いの影響

図によると、同じかぶり条件、同じ腐食範囲条件において、補修を施した場合の方が、健全な場合よりも鉄筋軸上ひび割れや剥離の発生時の膨張圧が小さいことがわかる。これは、それらの発生やその後の進展の過程に、補修方法や補修材料の性能の良し悪しが影響を及ぼす可能性があることを示唆するものである。

4.2 ひび割れ状況

(1) 全面腐食(シリーズA)

図-8に全面腐食した場合のひび割れおよび剥離状況を示す。上面にはそれらの発生順と発生箇所(かぶり面

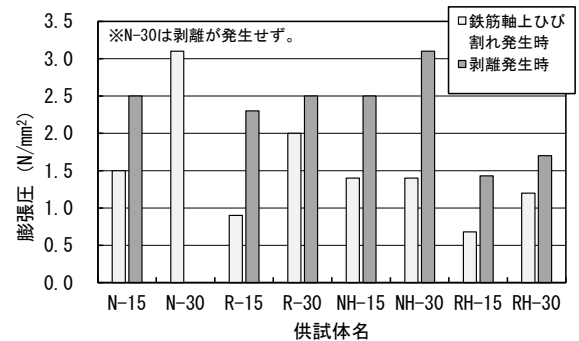


図-5 鉄筋軸上ひび割れおよび剥離発生時の膨張圧

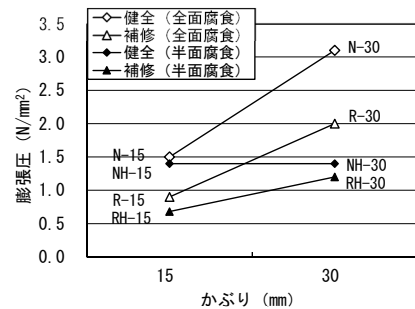


図-6 鉄筋軸上ひび割れ発生時の膨張圧

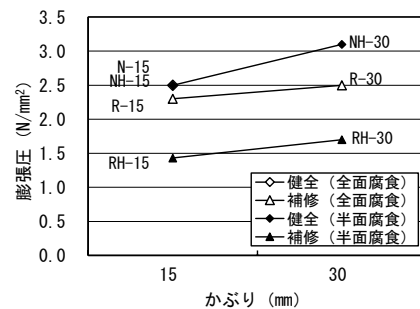


図-7 剥離発生時の膨張圧

または円孔縁)ならびに発生時の膨張圧を、上下面には円孔縁から供試体縁までのひび割れおよび剥離角度(鉄筋軸上を0°とし、時計回り方向を+とする)を併記した。破線は補修部との境界を示している。図-9に、全面腐食した場合の鉄筋軸上ひび割れおよび剥離発生時および最大膨張圧時の上面および円孔周辺のひずみ分布を示す。

図によると、健全な場合において、N-15(D/φ=2.0)は鉄筋軸上のひび割れがかぶり面に発生した後、片側の剥離、かぶり反対方向のひび割れ、もう片側の剥離の順に発生し、その後ひび割れや剥離の進展とともに膨張圧が低下し破壊に至った。堤らのかぶりが薄い場合のケース(図-1(b))と一致したが、その発生前に極めて薄い場合(D/φ=1.5以下)の挙動(図-1(a))が複合した結果となった。また、剥離の角度は、堤らの計算では理論上63°(図-2)とされていたが、それより小さい値となった。これは鉄筋軸上ひび割れの発生によって円孔周囲の引張応力の卓越箇所が変化したためと考えられる。

N-30はN-15と同様に鉄筋軸上のひび割れがかぶり面に発生したが間もなくかぶり反対方向のひび割れが発生

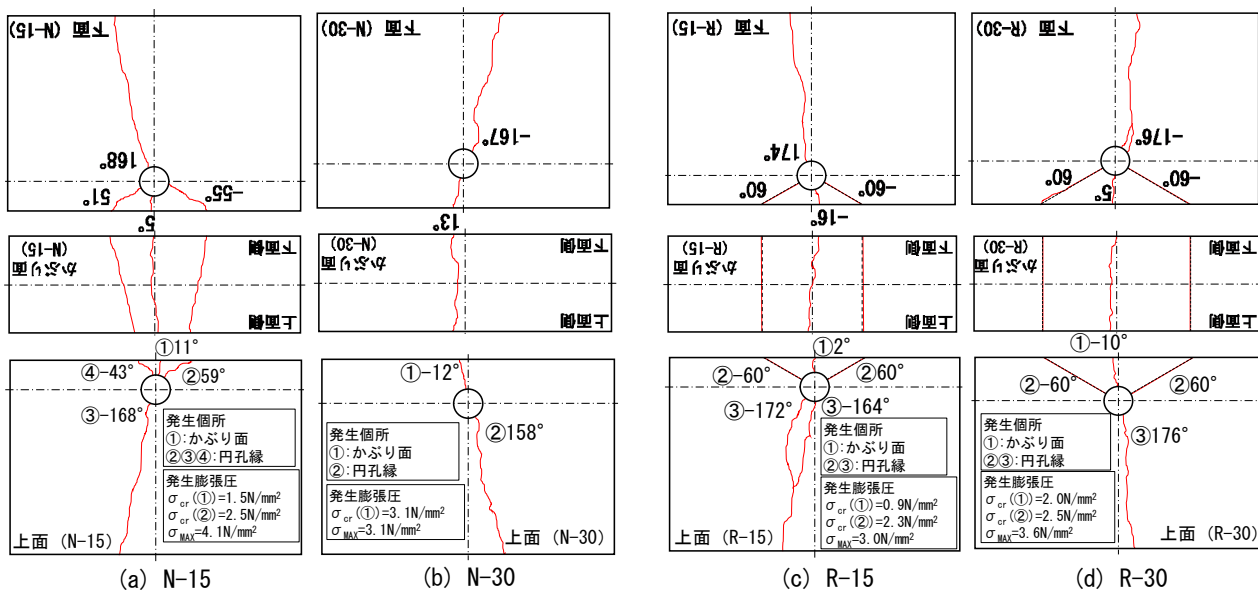


図-8 全面腐食時のひび割れおよび剥離状況 (シリーズ A)

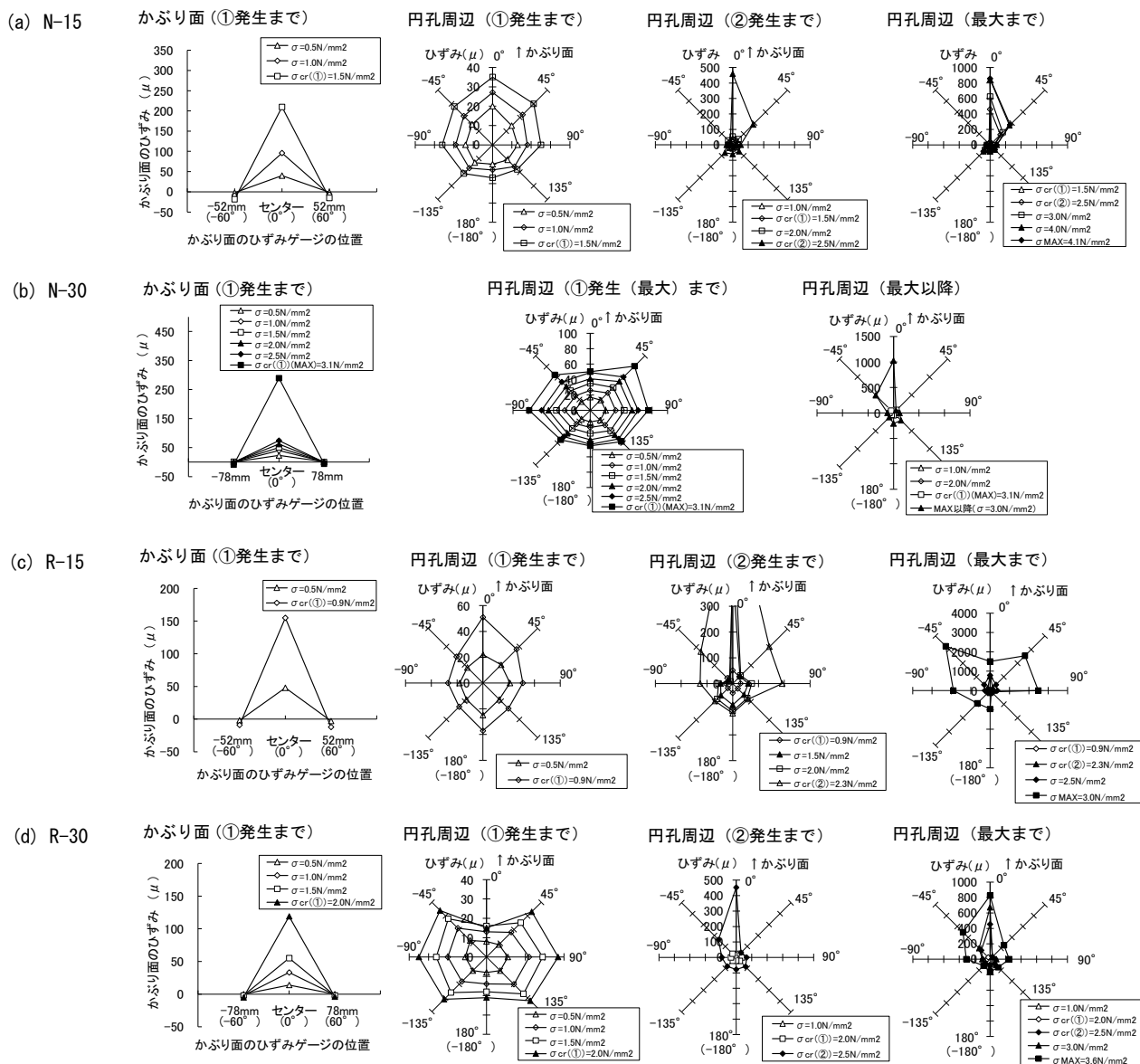


図-9 全面腐食時のひずみ分布 (シリーズ A)

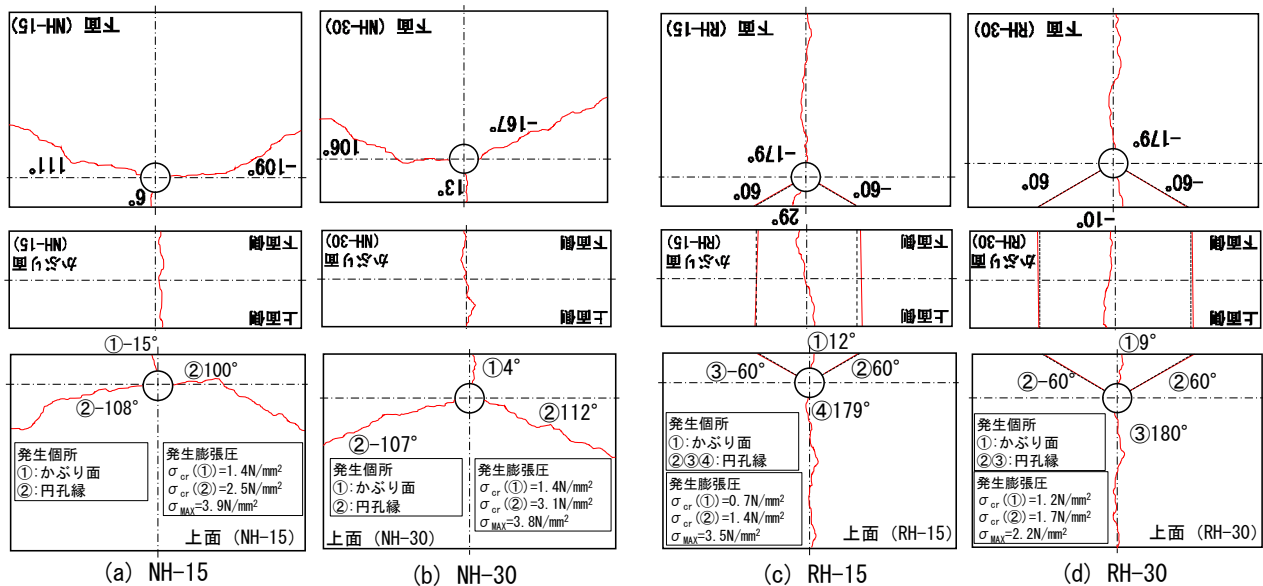


図-10 半面腐食時のひび割れおよび剥離状況 (シリーズ B)

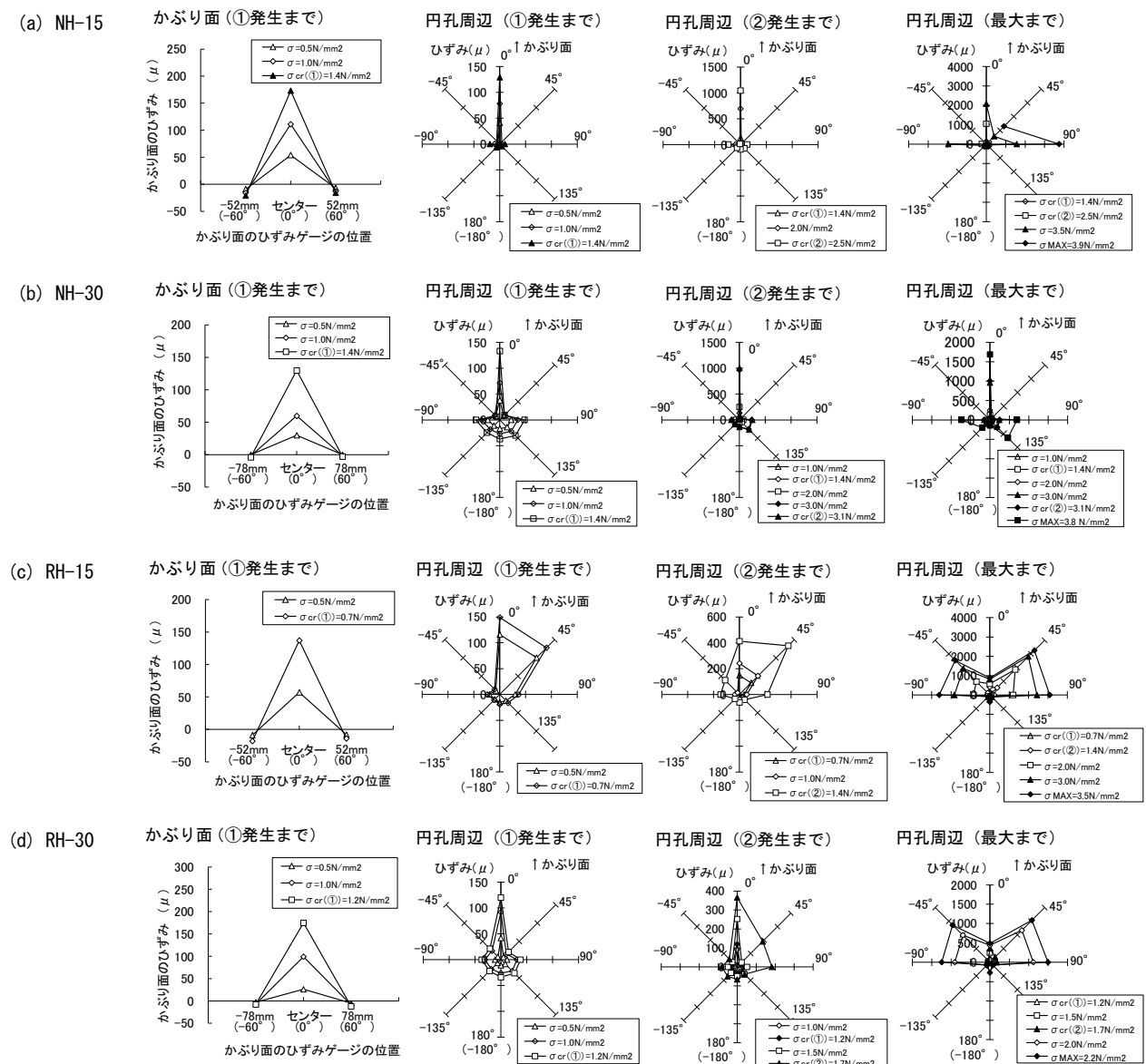


図-11 半面腐食時のひずみ分布 (シリーズ B)

し破壊に至り、堤らの厚いケース ($D/\phi=3.0$ 以上) の挙動 (図-1(c)) に近いものとなった。この鉄筋軸上のひび割れは、その後間もなく当該供試体の膨張圧が最大値を迎え破壊したことから、N-15 のひび割れ発生機構とは異なるものといえる。すなわち、円周上に均等の応力状態が作用し、供試体縁まで最も近い面から発生したひび割れによって裂かれるように破壊に至ったものと考えられる。また、ひび割れ発生までにかぶりが小さい場合より高い膨張圧まで耐えたことから、かぶりが厚いほうが高い膨張圧にまで抵抗できることが改めて示唆された。補修した場合においては、R-15 は、N-15 と同様に最初に鉄筋軸上のひび割れがかぶり面に発生したが、その後は N-15 と異なり新たな剥離によるひび割れでなく補修面の円孔縁側に補修部と健全部の境界部の剥離が認められた。その剥離は発生以降その境界部が裂けるように進展した。最後にかぶり反対方向のひび割れが発生し、全てのひび割れと剥離の進展とともに膨張圧が低下し破壊に至った。R-30 は N-30 と異なり R-15 と同様の破壊パターンとなった。この場合も、補修面の円孔縁側に剥離が発生した後、補修部と健全部の境界部が裂けるように進展した。この補修面の剥離の挙動に加え、鉄筋軸上ひび割れや剥離発生時の膨張圧において R-15 が N-15 より小さく、R-30 が N-30 より小さくなったことから総合的に考察すると、健全部または補修部の材料の引張強度よりも補修部と健全部の付着強度の方が低かった、すなわち補修面の剥離抵抗性が材料の引張強度よりも低かったことが本研究における補修した場合の供試体の破壊に至るまでの挙動の要因であったものと推測される。このことから、補修面の存在はその付着強度の性能によっては、今回のようにその性能が低いと考えられる場合は、健全な場合に比べひび割れや剥離パターンが変わることや、早めに鉄筋軸上ひび割れや剥離を発生させることなど、膨張圧への抵抗力低下の要因となることが見出された。故に、断面修復工法においては補修面における材料の剥離抵抗性の性能を高めることによって、健全な場合の破壊挙動に近づけることができると考察する。

(2) 半面腐食 (シリーズ B)

図-10 に半面腐食した場合のひび割れおよび剥離状況を示し、それらの発生順、発生箇所、発生時の膨張圧および角度を併記した。図-11 に半面腐食した場合の鉄筋軸上ひび割れおよび剥離発生時および最大膨張圧時の上面および円孔周辺のひずみ分布を示す。

図によると、健全な場合において、NH-15、NH-30 は鉄筋軸上のひび割れがかぶり面に発生した後、水平方向の剥離が発生し、その後ひび割れと剥離の進展とともに膨張圧が低下し破壊に至った。全面腐食の N-15、N-30 に比べて鉄筋軸上ひび割れの発生までは同じ様相を呈したが、

剥離においてはその角度がかなり大きくなった。これは、ひずみ分布をみると、腐食による膨張圧の加わり方が半面腐食のため最初にかぶり側に限定されたことによって鉄筋軸上ひび割れの発生が N-15、N-30 に比べて速いタイミングで生じたものと考えられ、その後の水平方向の剥離は、鉄筋軸上ひび割れの発生後に鉄筋のかぶり面側とその反対側の中央部における円孔周囲の引張応力が局部的に集中したのが要因と考えられる。

補修した場合においては、RH-15、RH-30 は、NH-15、NH-30 と異なり、R-15、R-30 と同様に鉄筋軸上ひび割れの発生後に補修面の剥離に至った。ひずみ分布からも、鉄筋軸上のひずみが大きくなった段階から、 45° 方向のひずみも増加し始めている様相を示しており、RH-15、RH-30 が NH-15、NH-30 と異なるひび割れや剥離状況になったのは、全面腐食時と同様に補修面の剥離に対する抵抗力、すなわち付着強度が材料そのものの引張強度よりも低かったためと考えられる。

5. まとめ

本研究の範囲内で得られた知見を以下に示す。

- (1) 補修の有無や腐食範囲の違いに関わらず、かぶりが大きい方が鉄筋軸上ひび割れおよび剥離発生時の膨張圧が大きい。
- (2) 補修の有無の違いに関わらず、かぶり側半面腐食の場合が全面腐食の場合より、鉄筋軸上ひび割れおよび剥離発生までの膨張圧が小さい。
- (3) 同じかぶり条件や腐食範囲条件において、補修を施した場合の方が、健全な場合よりも鉄筋軸上ひび割れや剥離発生時の膨張圧が小さかった。これはそれらの発生や進展の過程に、補修方法や補修材料の性能が影響を及ぼす可能性があることを示唆する。
- (4) 補修面の付着強度が材料の引張強度より低いことは、健全な場合に比べひび割れや剥離のパターンが変わることや、早めに鉄筋軸上ひび割れや剥離を発生させることなどの要因となる。

参考文献

- 1) 土木学会：2018 年制定 コンクリート標準示方書 [維持管理編]，2018
- 2) 土木学会：コンクリートライブラリー119 表面保護工法 設計施工指針(案) [工種別マニュアル編]，2005
- 3) 堤 知明，松島 学，村上 祐治，関 博：腐食ひび割れの発生機構に関する研究，土木学会論文集，No. 532/V-30，pp. 159-166，1996
- 4) 原田 哲夫，副田 孝一，出光 隆，渡辺 明：静的破砕剤の膨張圧測定法と膨張圧の諸性質，土木学会論文集，No. 478/V-21，pp. 91-100，1993