

論文 鉄筋腐食に伴うコンクリート部材のひび割れ進展に関する解析的研究

三浦 幸太*1・富田 充宏*2

要旨：鉄筋腐食によるコンクリート部材のひび割れ形状について、鉄筋径、かぶり厚を解析パラメータとし、剛体ばねモデルを用いた解析により検討した。鉄筋を1本配置した場合の解析結果は既往のひび割れ算定式による結果と一致し、鉄筋径とかぶり厚の関係によってひび割れ形状が異なる現象を精度よく再現できた。また、荷重増分量と膨張率の関係から、ひび割れ形状によるひび割れ進展の傾向の違いを説明できた。鉄筋を3本配置した場合の解析は、鉄筋間隔を変化させ、かぶり厚と鉄筋間隔の影響を詳細に検討した。その結果、かぶり厚が大きい場合でも鉄筋間隔が小さい場合は、はく離ひび割れが生じ易いことが推察された。

キーワード：鉄筋腐食、ひび割れ進展、RBSM、デローニ三角分割法

1. はじめに

高度経済成長期におけるインフラの拡大的整備とともに、メンテナンスフリーな材料としてコンクリートが大量に用いられ、今日まで膨大な量がストックされている。しかし、近年構造物定期点検の徹底とともに、塩害、アルカリ骨材反応、凍害等のコンクリート構造物特有の劣化が数多くの構造物で確認されてきている。なかでも塩害は、平成3年のスパイクタイヤの使用禁止により冬季の凍結防止剤散布量が増加し、飛来塩分量が多い海岸線付近だけではなく、都市部や山間部でも確認されている。

塩害のメカニズムとして、コンクリート表面からの塩分の浸透により、鉄筋が腐食膨張し、かぶりコンクリートに引張力が発生する。鉄筋腐食の進行に伴い、かぶりコンクリートにはひび割れが生じ、最終的にははく離・はく落へと進展する。塩害は鉄筋腐食による耐力への影響が大きいほか、かぶりコンクリートのはく落による第三者被害を招くことから、その予測・対策技術が維持管理上重要視されている。

実際のひび割れを観察した際には、図-1のように、コンクリートのかぶり厚が厚い場合は、鉄筋に沿うひび割れが生じ、かぶり厚さが薄い場合は、鉄筋に沿ったひび割れよりはく離に繋がる斜め方向のひび割れが卓越して生じる。また、鉄筋間隔が狭い場合には、鉄筋間の水平方向ひび割れが連続化し、かぶりコンクリートが大きくはく離する現象が生じる。このようなひび割れ形状に関する実験的研究が盛んに行われてきており、近年解析によりその進展過程を検討する研究¹⁾も行われている。

本研究は、非線形現象であるコンクリートのひび割れの進展を解析するため、川井より提案された離散化モデルである剛体ばねモデル(Rigid Bodies-Spring

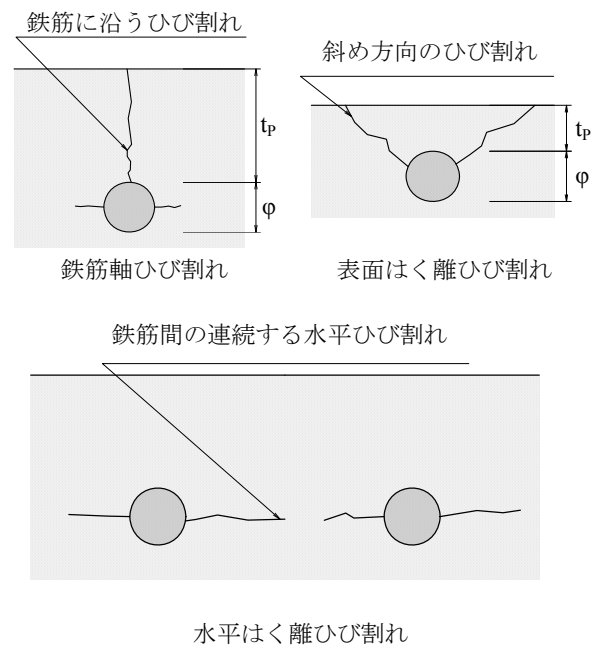


図-1 ひび割れ形状

Model : R B S M)²⁾を用いて解析を行う。この解析手法は、要素自体を剛体と仮定し、要素同士は各要素辺上に分布したばねにより結ばれ、このばねにエネルギーが集中して蓄えられているとして評価するため、要素間のすべりやはく離等の破壊現象を簡単に扱うことができ、鉄筋コンクリート構造物の解析³⁾や、鋼・コンクリートの合成構造の解析⁴⁾などに成果をあげている。

本研究は、鉄筋腐食によるコンクリートのひび割れの発生・進展する現象を、鉄筋径、かぶり厚、鉄筋間隔の異なるケースについて解析的に求め、そのひび割れ形状や膨張量と荷重の関係について比較するとともに、松島らが提案するひび割れ算定式⁵⁾との整合性について考察することを目的とする。

*1 (株) 国土開発センター 設計事業部構造部 (正会員)

*2 石川工業高等専門学校 環境都市工学科教授 博士(工学) (正会員)

2. ひび割れ算定式

コンクリート部材内に鉄筋を 1 本配置した場合のひび割れ形状は、大別すると「表面はく離ひび割れ」と「鉄筋軸ひび割れ」の 2 種類がある。前者は鉄筋から斜め方向にひび割れが発生し、かぶりコンクリートのはく離を伴うひび割れ形状であり、後者はコンクリート表面に対して水平と垂直にひび割れが発生するひび割れ形状である。なお、かぶり厚が大きい場合でも、かぶりに対して深度方向の厚さが大きい場合には、水平方向のひび割れが最終的に斜め方向に進展し、はく離が生じることが筆者らの既往の研究⁶⁾により確認されている。

松島らの実験及び実地調査によると、ひび割れ形状の違いは鉄筋のかぶりコンクリート厚さ t_p と鉄筋径 ϕ を用いて表され、以下の式(1)に示す。

$$(2t_p + \phi) / \phi \quad (1)$$

表-1 に示すように上記の式で求められる値が 3 未満の場合は表面はく離ひび割れが生じ、3 以上の場合には鉄筋軸ひび割れが発生するとしている。また、最大引張応力が発生し、ひび割れが生ずる角度 θ とかぶり厚さの無次元量との松島らの提案式を、以下の式(2)及び(3)に示す。

$$\pi - \theta = \sin^{-1}(\sinh \alpha / \cosh \alpha) \quad (2)$$

$$\alpha = \cos^{-1}\{(2t_p - \phi) / \phi\} \quad (3)$$

3. 解析方法

3.1 デローニ三角分割法

本研究の解析対象は、コンクリート部材外縁である外部境界及び鉄筋表面である内部境界を要素分割する必要がある。本研究の解析モデルのような、全体の形状に対して内部境界の位置が偏るような対象領域をブリ・プロセッサにより自動要素分割する場合、境界条件が複雑になり、一辺に対して他辺が極端に長くなる等のいびつな要素を含む三角形メッシュが作成される可能性がある。よって、解析において良好な三角形メッシュを得られる自動要素分割法として、デローニ三角分割法を使用した。生体の支配領域の設定や携帯電話の基地局の探査等の情報処理の分野でポロノイ図が利用されているが、デローニ三角分割法は、ポロノイ図の各ポロノイ辺の両側にある母点を線分で結ぶことによって得られ、分割された三角形の外接円内には他のどの節点も含まないという原理から、計算力学上有利な性質を有する分割方法である。以下にデローニ三角の幾何学的性質を示す。

- ・ デローニ辺とポロノイ辺は 1 対 1 に対応している。
- ・ 図-2 に示すように、対応するデローニ辺とポロノイ辺は互いに直交し、デローニ三角形の各辺の

表-1 かぶり厚 t_p と鉄筋径 ϕ の関係

		鉄筋径 ϕ			
		D13	D16	D22	D25
かぶり厚 t_p (mm)	20	4.08	3.50	2.82	2.60
		鉄筋軸	鉄筋軸	表面はく離	表面はく離
	50	8.69	7.25	5.55	5.00
		鉄筋軸	鉄筋軸	鉄筋軸	鉄筋軸

※上段は算定式の値、下段はひび割れ形状を示す。

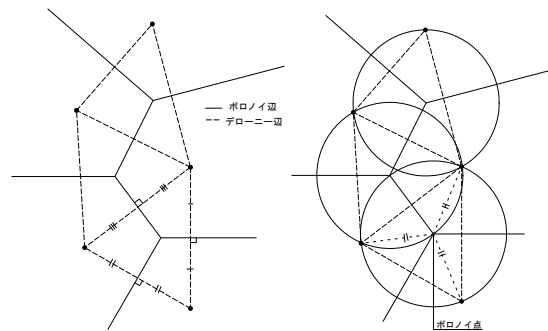


図-2 デローニ三角形 図-3 デローニ三角形と外接円

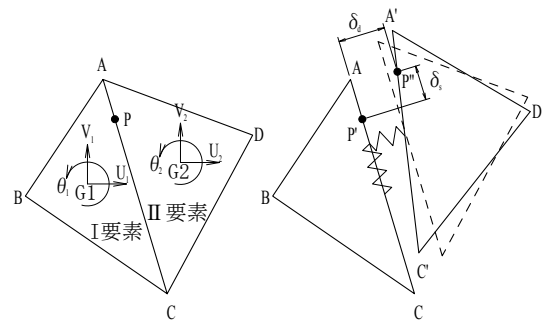


図-4 剛体-ばねモデル

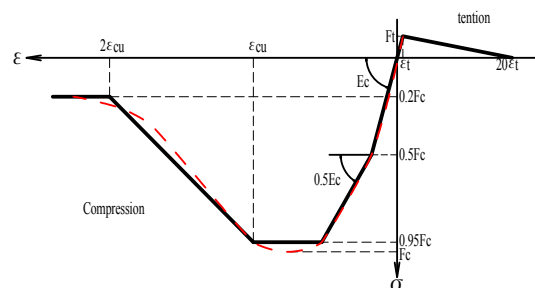


図-5 コンクリートの応力-ひずみ関係

表-2 コンクリートの物性値

ヤング係数	E_c	(kN/mm ²)	25.0
ポアソン比	ν_c		0.20
圧縮強度	F_c	(MPa)	30.0
引張強度	F_t	(MPa)	3.0
粘着力	C	(MPa)	4.14
内部摩擦角	ϕ	(°)	37.0

垂直二等分線がボロノイ辺になっている。

- ・ 図-3 に示すに、ボロノイ分割による多角形の頂点がデローニ分割による三角形の外接円の中心を示す。

3.2 剛体-ばねモデル

本解析法は、解析の対象物を有限個の微小要素に分割し、それ自身は剛体であると考え、要素同士をその境界面上に連続的に分布するばねによって連結させ、そのばねの変形により変形や内力の伝達が行われていると仮定したものである。

図-4に示す2つの三角形要素を考えると、要素境界面上の任意の点Pの変形後における相対変位 $\delta = [\delta_d, \delta_s]^T$ は、重心点の変位 $u_i = [u_1, v_1, \theta_1, u_2, v_2, \theta_2]^T$ を用いて、次式で表わされる。

$$\delta = M \cdot R \cdot Q \cdot u_i = B \cdot u_i \quad (4)$$

$$B = M \cdot R \cdot Q$$

ここに、 M は局所座標系における変位差を与えるマトリックス、 R は座標変換マトリックス及び Q は剛体変形を表す変形マトリックスである。また、相対変位成分に対応する仮想ひずみ成分 $\varepsilon = [\varepsilon_d, \gamma_s]^T$ を次式で定義する。

$$\varepsilon = \frac{1}{h} \delta \quad (5)$$

ここに、 h は要素の重心点 $G1, G2$ から要素境界面上に下ろした垂線の長さの和である。次に平面応力場における要素境界辺状の単位面積当たりの弾性時の表面力を次式のように仮定する。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_n &= \frac{E}{1-\nu^2} \varepsilon_d = \frac{E}{1-\nu^2} \frac{1}{h} \delta_d = K_d \delta_d \\ \tau_s &= \frac{E}{1+\nu} \gamma_s = \frac{E}{1+\nu} \frac{1}{h} \delta_s = K_s \delta_s \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

ここに、 E は弾性係数及び ν はポアソン比である。ゆえに、表面力 $\sigma = [\sigma_n, \tau_s]^T$ と相対変位 δ の関係がばね定数 K_d, K_s を用いて次式で表される。

$$\sigma = \begin{bmatrix} K_d & 0 \\ 0 & K_s \end{bmatrix} \delta = D \cdot \delta \quad (7)$$

以上より、変形後に分布ばね系に蓄えられるひずみエネルギーは次式で与えられる。

$$v = \frac{t}{2} \int_i \sigma^T \delta ds = \frac{t}{2} u_i^T \int_i (B^T D B) ds u_i \quad (8)$$

ここに、 t は要素の厚さ及び l は要素境界辺の長さである。したがって、式(8)にカスチリアノの定理を用いて要素重心点の変位と力の関係を結びつける剛性マトリックス K が求められる。

今回の解析で使用したコンクリートの材料特性を表-2のように与え、応力-ひずみ曲線を近似して図-5

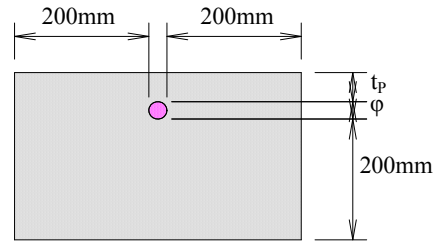


図-6 鉄筋を1本配置した解析対象

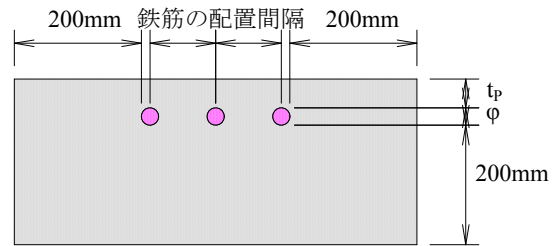


図-7 鉄筋を3本配置した解析対象

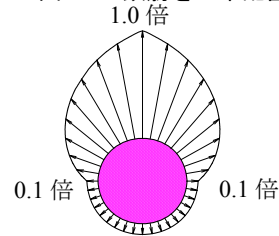


図-8 荷重モデル

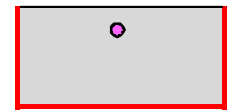


図-9 拘束条件

の実線で表した。引張特性はコンクリートの残留応力を軸ひずみの一次減少関数として与え、圧縮特性は圧縮限界ひずみ $\varepsilon_{cu}=0.3\%$ までをトリリニアとしている。また、要素境界面に作用する垂直応力 σ とせん断応力 τ の関係で生ずるコンクリートのせん断すべりに対しては、Mohr-Coulomb(直線包絡線)の条件を採用し、 $C=0.138F_c$ 、 $\varphi=37^\circ$ とした。

3.3 解析対象

本研究は、図-6, 7のように鉄筋を1本配置したものと3本配置したものに対して、鉄筋径 D13, D16, D22, D25 及びかぶり 20mm, 50mm のそれぞれ鉄筋が異なるケースについて解析を行った。なお、鉄筋を3本配置した解析は、鉄筋間隔が解析に影響を及ぼすため、50mm, 100mm の2種類の鉄筋間隔について解析を行った。表-3に本研究で実施した解析ケースを示す。

部材寸法は実構造物の外縁の部材を想定し、境界条件がひび割れ進展に影響しない範囲として、鉄筋外縁からそれぞれ200mm確保した寸法を設定した。

3.4 荷重モデルと拘束条件

鉄筋表面に与える膨張圧は、かぶり側からの塩分の浸透により鉄筋が腐食すると想定し、筆者らの既往の研究⁸⁾により、図-8のようにかぶり方向に対して下半分は0.1倍、上半分は0.1倍から1.0倍まで順次増加さ

せ、分割された鉄筋要素の辺上に垂直に荷重を与えている。拘束条件は図-9の赤線のように、側面の要素は水平方向と回転方向を固定、鉛直方向を自由とし、下面の要素は鉛直方向と回転方向を固定、水平方向を自由としている。

4. 解析結果

4.1 鉄筋を1本配置した部材の解析結果

解析により得られたひび割れの形状を図-10に示す。なお、図に示すひび割れは、ばねが引張強度を超過した箇所を示しており、ひび割れ幅との関係はない。

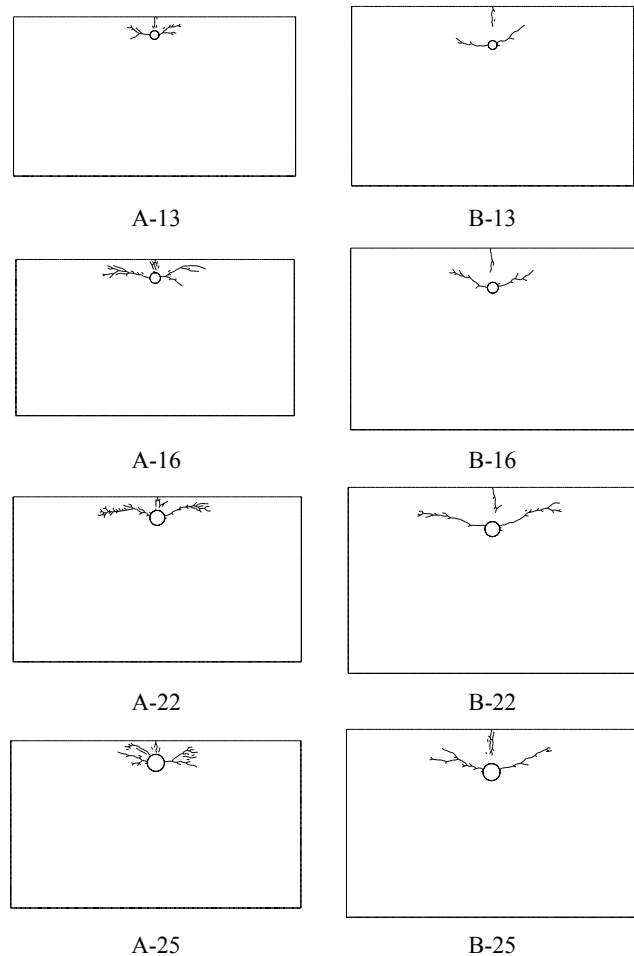
かぶり厚 20mm のケースでは後述の 50mm のケースと比較すると初期から斜め方向にひび割れが進展する傾向となった。かぶり深さの無次元量とひび割れ角度の関係を図-11に示す。図中の点は解析により得られた結果であり、曲線は松島等の提案式を示す。解析ケース A-22 及び A-25 では、他の解析よりひび割れ角度が小さく、表面はく離ひび割れが生じていると考えられる。また、解析ケース A-25 では他の解析ケースにはない斜め方向のひび割れが複数生じている。鉄筋径に対してかぶり厚が小さい場合の一般的傾向として、かぶりコンクリートによる側方拘束力が小さくなり、ひび割れやはく離が発生しやすくなることが推察される。

かぶり厚 50mm のケースでは、どのケースにおいてもひび割れ角度が 70° 前後であり、鉄筋径による違いは確認できない。また、すべてのケースで、水平方向及び鉛直方向のひび割れが進展しており、鉄筋軸ひび割れが生じていると推察できる。

上記の鉄筋を 1 本配置した計 8 つの解析ケースでは、松島らのひび割れ算定式と結果が一致したことや、かぶり厚や鉄筋径を変更することにより発生するひび割れ形状に明確な変化が生じることから、解析により構造物に生じるひび割れを推定することは可能であると考えられる。

解析により得られた膨張率と荷重増分量の関係を図-12, 13に示す。なお、荷重増分量は D13 の解析 1 ステップ分の荷重により無次元化しており、膨張率は膨

張前と各解析ステップにおける膨張後の鉄筋断面積の関係より以下の式(9)で与えている。



※左側：かぶり厚 $t_p=20\text{mm}$ ，右側：かぶり厚 $t_p=50\text{mm}$

図-10 解析によるひび割れ状況

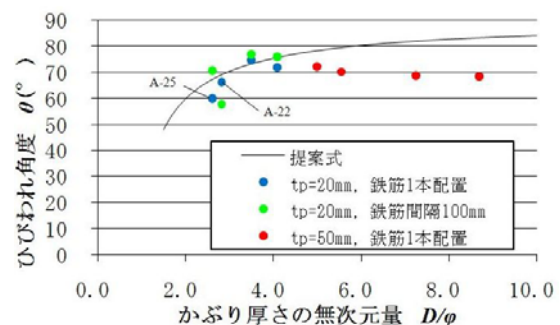


図-11 解析によるひび割れ状況

表-3 解析ケース

鉄筋の本数	かぶり厚 $t_p(\text{mm})$	鉄筋の配置間隔 (mm)	鉄筋径			
			D13	D16	D22	D25
1 本	20	—	A-13	A-16	A-22	A-25
	50	—	B-13	B-16	B-22	B-25
3 本	20	50	C-13	C-16	C-22	C-25
		100	D-13	D-16	D-22	D-25
	50	50	E-13	E-16	E-22	E-25
		100	F-13	F-16	F-22	F-25

$$\text{膨張率} = (A' - A) / A \quad (9)$$

A : 膨張前の鉄筋断面積

A' : 膨張後の鉄筋断面積

図-12 に示すかぶり厚 20mm はどのケースでも、荷重増分量が一定量に達した際に、膨張率が急激に変化する傾向となった。なお、鉄筋径が小さくなるにつれて、初期勾配が緩やかとなるが、鉄筋径に対してかぶり厚が増加し、かぶりコンクリートの剛性が増加するためと推察される。また、鉄筋径が小さくなるにつれて、勾配の変化が滑らかとなったが、かぶり厚に対して鉄筋径が小さい場合は、水平方向のひび割れが進行したのち、鉛直方向のひび割れが生じるのに対して、鉄筋径が大きい場合は、鉛直、水平方向のひび割れが同時に発生し、膨張圧にかぶりコンクリートが急激に抵抗できなくなるためであると推測される。

図-13 に示すかぶり厚 50mm の解析ケースは、各鉄筋径において直線の初期勾配が異なるほか、膨張率が急激に変化する荷重増分量に違いが見られた。50mm のケースは、20mm のケースと比較すると直線の勾配が非常に緩やかに変化する傾向となり、勾配の変化点が 2 箇所生じている。これは、かぶり厚 20mm の解析ケース A-13 及び A-16 のケースと同様に、水平方向のひび割れと鉛直方向のひび割れが同時期に発生しないためであると推察される。

かぶり厚 20mm 及び 50mm の荷重増分量-膨張率の関係やひび割れ形状から、鉄筋径に対してかぶり厚が大きい場合は、腐食による膨張に対して、緩やかにひび割れが進行する。また、かぶり厚が小さい場合は、膨張圧にかぶりコンクリートが急激に抵抗できなくなり、はく離を起こす可能性が高いことが推察される。

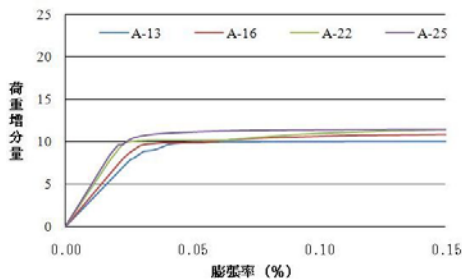


図-12 荷重増分量と膨張率(かぶり厚 $t_p=20\text{mm}$)

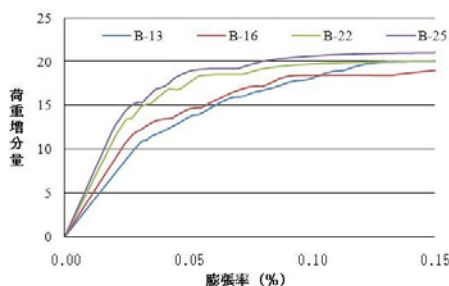
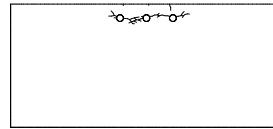
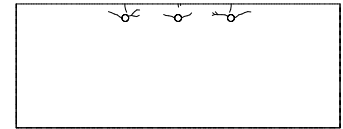


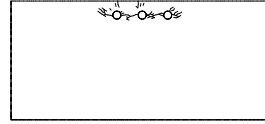
図-13 荷重増分量と膨張率(かぶり厚 $t_p=50\text{mm}$)



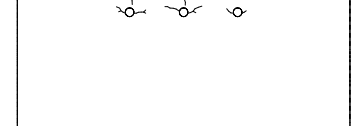
C-13



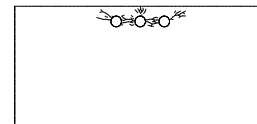
D-13



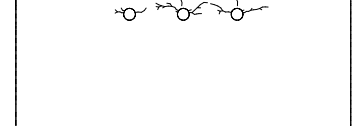
C-16



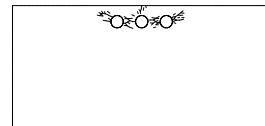
D-16



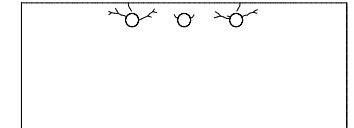
C-22



D-22



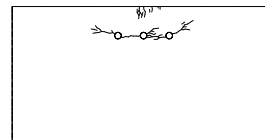
C-25



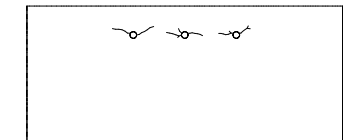
D-25

※左側：鉄筋間隔 50mm，右側：鉄筋間隔 100mm

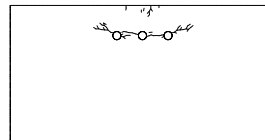
図-14 解析によるひび割れ状況(かぶり厚 $t_p=20\text{mm}$)



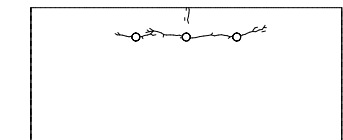
E-13



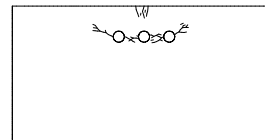
F-13



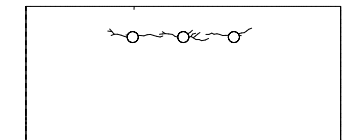
E-16



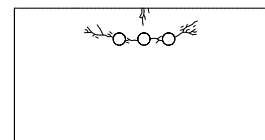
F-16



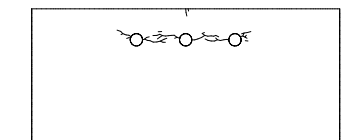
E-22



F-22



E-25



F-25

※左側：鉄筋間隔 50mm，右側：鉄筋間隔 100mm

図-15 解析によるひび割れ状況(かぶり厚 $t_p=50\text{mm}$)

4.2 鉄筋を3本配置した部材の解析結果

かぶり厚 20mm の場合の解析により得られたひび割れ形状を図-14 に示す。鉄筋間隔 50mm のケースでは、水平方向のひび割れが連続化し、水平はく離ひびわれが生じている。また、鉄筋間隔 100mm のケースでは、図-11 の青点のプロットで示す通り、鉄筋を 1 本配置した場合とひび割れ角度に大きな変化はなく、D-22 及び D-25 のケースで表面はく離ひび割れが生じていると推察される。鉄筋間隔 50mm では発生するひび割れが繋がり、互いに干渉しているが、鉄筋間隔 100mm の場合はひび割れが連続することはない、ひび割れ算定式とも結果が一致することから、かぶり厚が小さい場合は鉄筋間隔が水平はく離ひび割れの発生の有無に影響を及ぼすと推察される。

かぶり厚 50mm の場合の解析により得られたひび割れ発生状況を図-15 に示す。どのケースにおいても、水平方向ひび割れが生じていることから、水平はく離ひび割れと推定される。これは、かぶり厚が大きい場合は鉛直方向のひび割れが進行する前に、鉄筋間のひび割れが連続し、コンクリート塊が一体となって押し出され、水平はく離ひび割れの発生が容易となるためと考えられる。また、E-25 では、他の解析結果よりひび割れ角度が急であり、鉄筋径が太い場合は付近の鉄筋の腐食膨張の影響を強く受けると考えられる。

鉄筋間隔 100mm の解析ケースで比較すると、かぶり厚 20mm ではひび割れは互いに干渉しなかったが、かぶり厚 50mm では水平方向のひび割れが連続することから、かぶり厚が大きい場合は、鉄筋間隔が水平はく離ひび割れの発生の有無に影響を及ぼさないと推察される。よって、実構造物においても、橋脚梁部等の密に配筋される部材は、かぶり厚が十分であっても、水平方向ひび割れが連続化し、はく離が生じる可能性があるかと推察される。

5. まとめ

本研究では、剛体-ばねモデルを用いて、鉄筋腐食に伴うコンクリートのひび割れ形状について解析的な検討を実施した。鉄筋を 1 本配置した場合の解析では、松島らのひび割れ算定式との整合について確認し、ひび割れ形状の違いによるひび割れの進展過程について検討を行った。また、鉄筋を 3 本配置し、鉄筋間隔を変化させて行った解析では、鉄筋間隔がひび割れ形状に与える影響について検討を行った。

以下に本研究で得られた知見を列挙する。

- (1) ひび割れ算定式と解析結果が一致したことから、剛体-ばねモデルを用いた非線形解析により、ひび割れの進展を推定することは可能である。
- (2) 鉄筋径に対してかぶり厚が大きい場合は、腐食によ

る膨張に対して、緩やかにひび割れが進行するが、かぶり厚が小さい場合は、膨張圧にかぶりコンクリートが急激に抵抗できなくなり、はく離を起こす可能性がある。

- (3) ひび割れ形状は鉄筋間隔に影響を受け、かぶり厚や鉄筋径が大きい場合に、より影響を受けやすい傾向がある。
- (4) 鉄筋間隔により大きな影響を受けることから、配筋鉄筋や部材形状等の他の境界条件に対しても影響を受けることが予想される。

本研究は、鉄筋腐食によりコンクリート部材に膨張圧が作用した際に生じるひび割れの解析的検討である。奥行き方向に鉄筋が配置された 2 次元モデルについて解析を行ったが、鉄筋間隔によりひび割れ形状に影響があったことから、配筋や部材形状が解析結果に大きな影響を与えることが予想される。よって、実構造物の鉄筋腐食によるひび割れを解析するためには、3 次元モデルにより、交差する鉄筋による拘束力等を考慮する必要がある。

参考文献

- 1) 車谷麻緒 他：鉄筋の腐食膨張のモデル化とコンクリートのひび割れ挙動の数値解析，土木学会論文集，Vol.63，No.1，pp.167-178，2007
- 2) 竹内則雄 他：鉄筋コンクリート構造の離散化極限解析法，丸善株式会社，2005
- 3) 富田充宏・梶川康男・吉田直司：軸力と繰返し曲げを受けるRC部材のRBSMによる挙動解析，構造工学論文集，Vol.43A，pp.347-354，1997
- 4) 鬼頭宏明 他：RBSMによる形鋼シアコネクタの離散化極限解析，計算工学講演会論文集，Vol.1，No.2，pp.917~920，1996
- 5) 松島学 他：鉄筋の腐食膨張によるひびわれモード，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.15，No.1，1993
- 6) 三浦幸太 他：複数配置された鉄筋の腐食に伴うひび割れ性状に関する解析的研究，第65回土木学会年次学術講演会，2010
- 7) 鬼頭宏明・竹内則雄・上田真稔・樋口晴紀・上林厚志・富田充宏：RBSMによる鋼コンクリート合成構造のシアコネクタに関する離散極限解析，構造工学における数値解析シンポジウム論文集，Vol.19，pp.213-218，1995
- 8) 三浦幸太 他：鉄筋腐食に伴うコンクリート部材のひび割れ性状及び膨張圧に関する解析的研究，第64回土木学会年次学術講演会，2009