

# 論文 複数の鉄筋腐食膨張圧がコンクリートの拘束圧に及ぼす影響

長岡 和真\*1・古川 雄太\*2・村上 祐貴\*3

**要旨:** 本研究では、複数の鉄筋腐食膨張圧がコンクリートの拘束圧に及ぼす影響評価を目的として、静的破砕剤を用いた腐食膨張模擬実験を行った。その結果、かぶり厚と鉄筋間隔によってかぶり面の鉄筋軸方向に発生するひび割れの性状が変化した。また、腐食膨張圧の相互影響により、単独の腐食膨張圧が作用した場合に比べて最大拘束圧は低下し、その低下割合は鉄筋間隔とかぶり厚の影響を受けることを明らかにした。さらに、腐食膨張圧のコンクリート部への影響範囲は、かぶり厚の約 1.5 倍を半径とした円の領域まで及ぶ可能性を示した。

**キーワード:** 鉄筋腐食, 腐食ひび割れ, 腐食膨張影響範囲, コンクリートの拘束圧

## 1. はじめに

RC 部材において、腐食ひび割れ発生限界腐食量およびその後の腐食ひび割れ幅の拡大は、コンクリートの拘束圧によって異なる。例えば、かぶり厚、圧縮強度が大きいほど腐食ひび割れ発生限界腐食量は大きくなるが、これはコンクリートの拘束圧が高いためであると考えられる。

したがって、腐食ひび割れ発生限界腐食量の推定や、かぶりコンクリートに生じた腐食ひび割れ幅と鉄筋腐食量を関連付けるためには、コンクリートの圧縮強度やかぶり厚、腐食劣化状態によって変化するコンクリートの拘束圧を定量的に評価する必要がある。

このような背景から著者らは、コンクリートの圧縮強度やかぶり厚、かぶりコンクリートのひび割れ幅がコンクリートの拘束圧に及ぼす影響を実験的に明らかにするとともに、拘束圧算定式を提案した<sup>1)</sup>。しかしながら既往の研究では、単独の腐食膨張に対する拘束圧の評価であり、実構造物のように複数の鉄筋が配筋された場合には、それぞれの腐食膨張が相互に影響することが考えられるが、この点については未検討であった。

そこで本研究では、複数の鉄筋腐食膨張圧がコンクリートの拘束圧に及ぼす影響評価を目的として、静的破砕剤を用いた複数鉄筋腐食膨張模擬実験および二次元 FEM 解析を実施した。

## 2. 実験手法

使用環境中の実構造物に生じる鉄筋腐食は空間的に不均一性を生じるが、本研究では複数の鉄筋が空間的に一様に腐食している条件下においてコンクリートの拘束圧について検討した。

### 2.1 実験概要

本実験では、直径 22mm の鉄筋が空間的に一様に腐食した場合を想定しており、試験体形状は図-1 に示す通りである。試験体は角柱試験体であり、所定の位置に直径 22mm の円孔を設けた。円孔内には拘束圧測定用の鋼管パイプを挿入し、その隙間に腐食膨張圧を模擬するため静的破砕剤を充填した。後述するが、本実験では拘束圧測定に際し、鋼管パイプの内曲面にひずみゲージを貼付する必要がある。したがって、作業性という点では鋼管パイプの外径を極力大きくすることが望ましいが、鋼管パイプを大きくすると、円孔と鋼管パイプの隙間が小さくなり、静的破砕剤を均一に充填できない恐れがある。

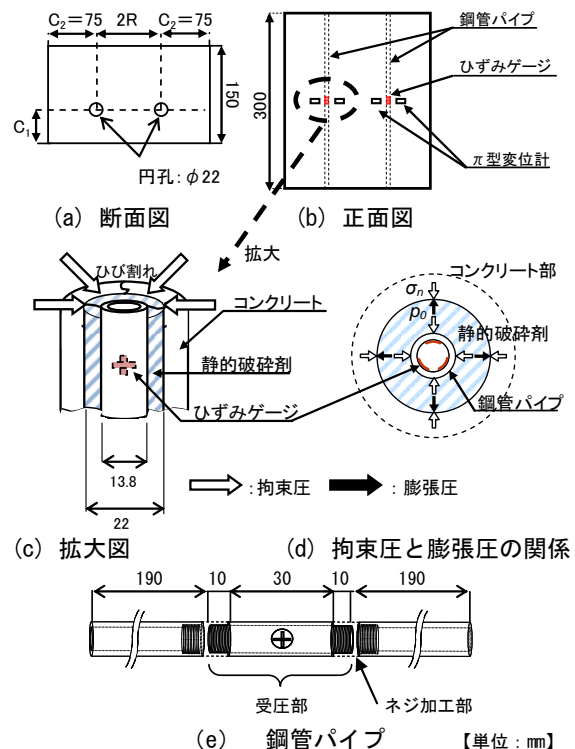


図-1 試験体概要図

\*1 長岡工業高等専門学校 環境都市工学専攻科 (正会員)

\*2 長岡工業高等専門学校 環境都市工学科

\*3 長岡工業高等専門学校 環境都市工学科准教授 博(工) (正会員)

表-1 実験パラメータ

試験体名	水セメント比 W/C (%)	かぶり厚 (mm)		鉄筋間隔 2R(mm)	R/C <sub>1</sub>	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )	最大拘束圧		ひび割れ性状	σ <sub>n-max</sub> <sup>※2</sup> (N/mm <sup>2</sup> )	σ <sub>n-multi-max</sub> / σ <sub>n-max</sub>
		縦: C <sub>1</sub>	横: C <sub>2</sub>					σ <sub>n-multi-max</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	変動係数 (%)			
C75-R/C <sub>1</sub> 0.50	60	75	75	75	0.50	32.6	28367	7.30	6.8	片側	11.77	0.62
C75-R/C <sub>1</sub> 0.60 ※1				90	0.60	23.1	28039	8.07	3.3	片側	10.75	0.75
C75-R/C <sub>1</sub> 0.75				112.5	0.75	31.0	27562	8.06	1.6	片側	11.60	0.69
C75-R/C <sub>1</sub> 1.00				150	1.00	27.0	25835	9.39	5.3	片側or両側 ※3	11.17	0.84
C75-R/C <sub>1</sub> 1.25				187.5	1.25	33.0	30223	10.34	2.8	両側	11.82	0.88
C75-R/C <sub>1</sub> 1.33 ※1				200	1.33	24.3	26252	9.93	6.3	両側	10.88	0.91
C60-R/C <sub>1</sub> 0.50	60	60	75	60	0.50	32.3	26438	5.72	9.5	片側	8.87	0.65
C60-R/C <sub>1</sub> 0.75				90	0.75	29.1	27863	7.08	4.8	片側 ※3	8.52	0.83
C60-R/C <sub>1</sub> 1.00				120	1.00	34.4	27819	7.11	5.8	片側or両側	9.09	0.78
C60-R/C <sub>1</sub> 1.25				150	1.25	27.5	27885	8.39	7.8	両側	8.35	1.00
C50-R/C <sub>1</sub> 0.50				50	0.50	32.1	29597	4.50	6.0	片側	6.93	0.65
C50-R/C <sub>1</sub> 0.75				75	0.75	35.7	25337	4.97	12.1	片側	7.32	0.68
C50-R/C <sub>1</sub> 1.00	60	50	75	100	1.00	23.6	26438	5.98	12.1	片側or両側 ※3	6.02	0.99
C50-R/C <sub>1</sub> 1.25				125	1.25	28.9	28574	5.83	11.8	両側	6.59	0.89
C40-R/C <sub>1</sub> 0.50				40	0.50	28.2	29648	3.57	1.3	片側	4.59	0.78
C40-R/C <sub>1</sub> 0.75				60	0.75	29.4	28190	3.94	8.1	片側	4.72	0.83
C40-R/C <sub>1</sub> 1.00	60	40	75	80	1.00	30.4	31540	4.50	3.2	片側or両側 ※3	4.83	0.93
C40-R/C <sub>1</sub> 1.25				100	1.25	32.1	30148	4.44	0.2	両側	5.01	0.88

※1. かぶり面のひび割れ幅は未計測 ※2. 式(2)より算出した単鉄筋最大拘束圧 ※3. 「片側ひび割れ」と「両側ひび割れ」の2種類のひび割れ性状が確認された

そこで本実験では、可能な限り鋼管パイプの外径を小さくし、静的破砕剤の充填不良が生じないようにした。

静的破砕剤の膨張挙動は、原田ら<sup>2)</sup>によって液圧的であることが報告されており、図-1(d)に示すように拘束圧は鋼管パイプに作用する外圧とほぼ等価となることから、以下の手法により拘束圧を求めた。

鋼管パイプの内曲面に2軸のひずみゲージを3枚貼付し、鋼管に生じる軸方向および円周方向のひずみを計測した。なお図-1(e)に示すように、膨張圧を計測する受圧部の長さを50mmと短くすることで視野および作業性を確保し、ひずみゲージを貼付した。計測したひずみ値を、中空円筒理論を用いた式(1)に代入して拘束圧を算出した。

$$\sigma_n = p_0 = \frac{-E(k^2 - 1)}{2k^2(1 - \nu^2)}(\epsilon_\theta + \nu\epsilon_z) \quad (1)$$

ここで、σ<sub>n</sub>: 拘束圧(N/mm<sup>2</sup>)、p<sub>0</sub>: 膨張圧(N/mm<sup>2</sup>)、E: 鋼管の弾性係数(200000N/mm<sup>2</sup>)、ε<sub>θ</sub>: 鋼管の円周方向ひずみ、ε<sub>z</sub>: 鋼管の軸方向ひずみ、k: 鋼管の外内径比(外径: 13.8mm,内径: 9.2mm)、ν: 鋼管のポアソン比(0.3)である。

図-1に示すように、試験体の最小かぶり面中央部の各円孔軸と直行する方向にπ型変位計を設置し、膨張圧に起因する縦ひび割れ幅の計測を行った。ただし円孔間隔50mm以下の試験体(C50-R/C<sub>1</sub>0.50およびC40-R/C<sub>1</sub>0.50試験体)では、π型変位計を並列に設置できないため、所定の位置からそれぞれ上下に20mm移動させた。

## 2.2 実験パラメータ

実験パラメータを表-1に示す。実験パラメータは、かぶり厚(芯かぶり)と円孔間隔である。縦かぶり厚(C<sub>1</sub>)は75mm, 60mm, 50mm, 40mmの4水準、横かぶり厚(C<sub>2</sub>)は75mmで統一した(図-1参照)。なお、各パラメータにつき試験体は3体作製した。

図-2に示すように、腐食膨張圧のコンクリート部への影響範囲は、最小かぶり厚を半径とした円として考えることが多い<sup>3)</sup>。本研究においても、最小かぶり厚を半径とした円を腐食膨張圧のコンクリート部への影響範

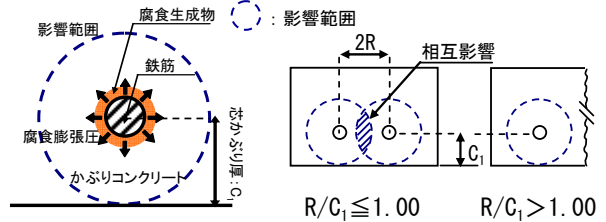


図-2 膨張圧の影響範囲と R/C<sub>1</sub>

表-2 配合表

W/C (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				
	水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤
60	155	258	835	1040	2.58

囲であると仮定し、円孔間隔の1/2の距離(R)と最小かぶり厚(C<sub>1</sub>)の比(以後R/C<sub>1</sub>と称する)を用いて円孔間隔(2R)を選定した。腐食膨張圧の影響範囲を上述のように仮定すると図-2に示すように、R/C<sub>1</sub> ≤ 1.00では影響範囲は重なり合い、各膨張圧の相互作用が生じる。一方、R/C<sub>1</sub> > 1.00では各影響範囲は接しない状態となり、各膨張圧の相互作用は生じないことになる。

コンクリートの配合は表-2に示す通りである。セメントは早強ポルトランドセメントを使用した。

## 3. 実験結果

図-3に一例としてC60-R/C<sub>1</sub>1.00試験体の拘束圧と時間の関係を示す。各鋼管に作用する時間経過に伴う膨張圧(拘束圧)挙動は、どちらかの鋼管に作用する膨張圧(拘束圧)が最大値を示す時点まで同様であった。このような傾向は全ての試験体でみられ、各円孔内の膨張挙動に差異がないことを確認した。

### 3.1 かぶり面のひび割れ性状と各鋼管に作用する拘束圧

#### (1) かぶり面のひび割れ性状

図-4に試験体のひび割れ性状の一例を示す。全ての試験体において、最小かぶり面にひび割れが卓越して進行した。また、R/C<sub>1</sub> = 1.25の一部の試験体を除いた全ての試験体の端面に、円孔間を繋ぐ水平ひび割れが生じた。ひび割れ発生パターンは、図-4(a)に示すようにどち

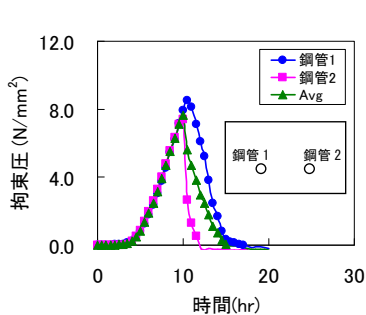


図-3 拘束圧と時間の関係 (a) C40-R/C<sub>1</sub>0.75 (b) C40-R/C<sub>1</sub>1.00 (C60-R/C<sub>1</sub>1.00)

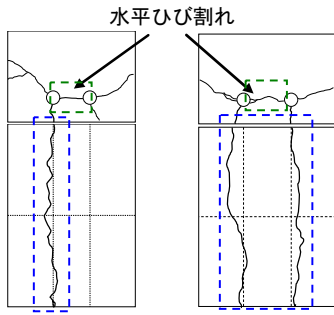


図-4 ひび割れ性状

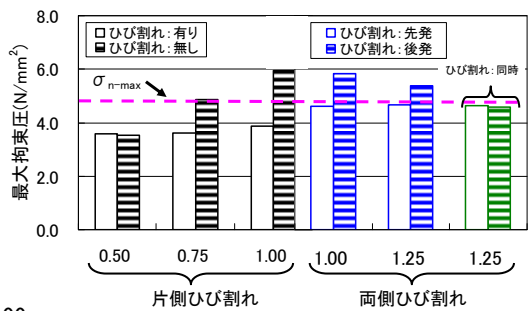
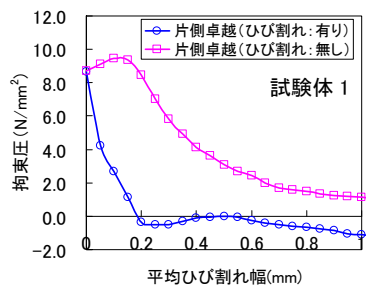
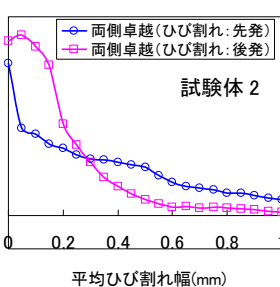


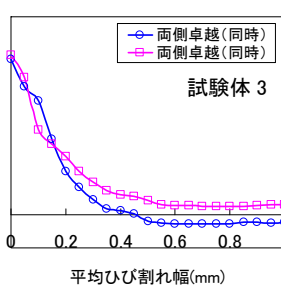
図-5 最大拘束圧と R/C<sub>1</sub> の関係 (C<sub>1</sub>=40mm)



(a) 片側ひび割れ



(b) 両側ひび割れ



(c) 両側ひび割れ (同時)

図-6 拘束圧と平均ひび割れ幅の関係 (C75-R/C<sub>1</sub>1.00)

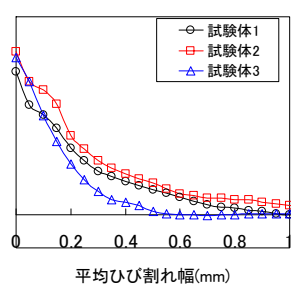


図-7  $\sigma_{n-multi}$  と平均ひび割れ幅の関係 (C75-R/C<sub>1</sub>1.00)

らかの円孔軸に沿ってひび割れが発生する場合（片側ひび割れ）と、図-4(b)に示すように両方の円孔軸に沿ってひび割れが発生する場合（両側ひび割れ）の2つであった。表-1に各試験体のひび割れ発生パターンを示すが、 $R/C_1 < 1.00$ 時は片側ひび割れ、 $R/C_1 > 1.00$ 時は両側ひび割れになることから、 $R/C_1 = 1.00$ がひび割れ発生パターンの閾値であると考えられる。このようなひび割れ発生パターンの傾向は既往の研究結果と一致している<sup>3)</sup>。

また、両側ひび割れにおいて、各円孔軸に沿ったひび割れが同時に発生する場合と、時間差で生じる場合では拘束圧が異なる傾向を示すことから明確に区別して検討する。

### (2) 各鋼管に作用する拘束圧

図-5に一例として、 $C_1 = 40\text{mm}$ における各鋼管に作用する最大拘束圧と $R/C_1$ の関係を示す。図中には、単独の腐食膨張圧に対するコンクリートの拘束圧の最大値（単鉄筋最大拘束圧）を併せて示した。なお、単鉄筋最大拘束圧（以後 $\sigma_{n-max}$ と称する）は、著者が提案した式(2)より算出した<sup>1)</sup>。

$$\sigma_{n-max} = 0.1916C_1 + 0.1076f'_c - 6.1043 \quad (2)$$

$(40 \leq C_1 \leq 75, \quad 22.6 \leq f'_c \leq 55.5)$

ここで $\sigma_{n-max}$ ：単鉄筋最大拘束圧(N/mm<sup>2</sup>)、 $C_1$ ：最小かぶり厚(mm)、 $f'_c$ ：圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>)である。

$R/C_1$ が大きくなるに伴い最大拘束圧は、 $\sigma_{n-max}$ に近づく傾向を示した。また、片側ひび割れの場合をみると、鋼管軸（円孔軸）上にひび割れが発生しない方の最大拘束

圧は、発生した方と比べて大きく、かつ $\sigma_{n-max}$ を上回るケースがある。一方、両側ひび割れの場合をみると、鋼管軸（円孔軸）上にひび割れが遅延して発生した方が最大拘束圧は大きく、かつ $\sigma_{n-max}$ を上回る傾向にある。また、鋼管軸（円孔軸）上のひび割れが同時に発生する場合は、各鋼管に作用する拘束圧に差異は生じなかった。

図-6にC75-R/C<sub>1</sub>1.00試験体3体の拘束圧と各鋼管軸上に発生したひび割れ幅の平均値（平均ひび割れ幅）の関係をひび割れパターン毎に示す。なお、片側ひび割れの場合は1本のひび割れ幅を2で除した値である。図-6より、ひび割れパターンの違いにより各試験体の拘束圧の低下傾向は異なっている。

図-6の各試験体の拘束圧を、平均拘束圧を用いて整理すると図-7に示すようになる。平均拘束圧（以後 $\sigma_{n-multi}$ と称する）とは、各鋼管に作用する拘束圧を同一時間軸上で平均した値である（図-3参照）。図-7より、ひび割れパターンの違いによらず、各試験体の拘束圧の低下傾向は概ね同様であった。

これより、同一実験条件において、拘束圧が解放されるまでに必要とする総エネルギー量はひび割れパターンによらず一定であり、ひび割れ性状によって各円孔から消費されるエネルギーの割合が異なると考えられる。

したがって、複数の鉄筋腐食膨張圧に対するコンクリートの拘束圧について評価するためには、まずは複数鉄筋の平均的な拘束圧について明らかにすることが重要であると考えられる。

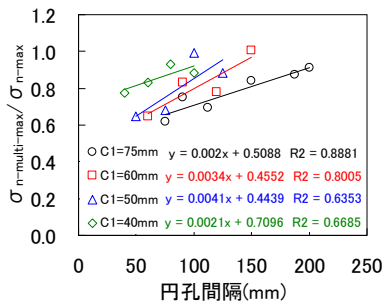


図-8  $\sigma_{n\text{-multi-max}}/\sigma_{n\text{-max}}$  と  
円孔間隔の関係

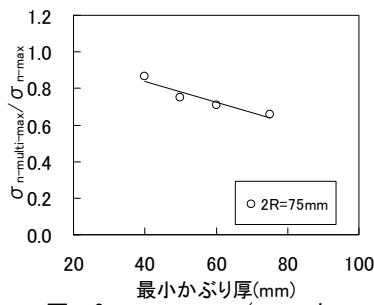


図-9  $\sigma_{n\text{-multi-max}}/\sigma_{n\text{-max}}$  と  
最小かぶり厚の関係

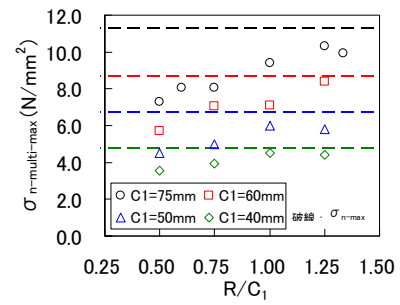


図-10  $\sigma_{n\text{-multi-max}}$  と  
 $R/C_1$  の関係

### 3.2 平均拘束圧に及ぼす各種影響

#### (1) 円孔間隔の影響

図-8 に複鉄筋最大平均拘束圧と単鉄筋最大拘束圧の比 ( $\sigma_{n\text{-multi-max}}/\sigma_{n\text{-max}}$ ) と円孔間隔の関係を示す。複鉄筋最大平均拘束圧 (以後  $\sigma_{n\text{-multi-max}}$  と称する) とは、先述した拘束圧の算出方法によって本実験より得られた平均拘束圧の最大値のことである。また、表-1 には各試験体の  $\sigma_{n\text{-multi-max}}$  (試験体3体の平均値) と変動係数を示した。図-8 より同一最小かぶり厚における  $\sigma_{n\text{-multi-max}}/\sigma_{n\text{-max}}$  は、円孔間隔の増加に伴い増加した。

図-8 に示すように、最小かぶり厚毎に回帰式を求め、円孔間隔  $2R = 75\text{mm}$  における各最小かぶり厚の  $\sigma_{n\text{-multi-max}}/\sigma_{n\text{-max}}$  を算出し、その結果を図-9 に示した。

最小かぶり厚が小さいほど  $\sigma_{n\text{-multi-max}}/\sigma_{n\text{-max}}$  は増加する傾向を示した。これは、最小かぶり厚が小さいほど最小かぶり面へのひび割れ進展、拡大が顕著に生じ、内部横方向へのひび割れが進展しにくく、各膨張圧の相互作用が相対的に小さくなるためであると考えられる。

#### (2) 各膨張圧の相互作用の影響

図-10 に  $\sigma_{n\text{-multi-max}}$  と  $R/C_1$  の関係を示す。図中には、式(2)より算出した各最小かぶり厚の、 $\sigma_{n\text{-max}}$  を破線で示した。算出に際し、各試験体の平均圧縮強度を用いた。また破線は、各最小かぶり厚と同色で示した。

同一最小かぶり厚において  $\sigma_{n\text{-multi-max}}$  は、 $R/C_1$  が大きくなるにしたがい、最小かぶり厚が同じ  $\sigma_{n\text{-max}}$  に漸近する傾向を示した。また、 $R/C_1 = 1.00$  において、 $\sigma_{n\text{-multi-max}}$  は  $\sigma_{n\text{-max}}$  より小さい。これより、本実験の範囲内ではあるが、腐食膨張圧のコンクリート部への影響範囲は最小かぶり厚を半径とした円の領域よりも大きいと考えられる。

図-11 に  $\sigma_{n\text{-multi-max}}/\sigma_{n\text{-max}}$  と  $R/C_1$  の関係を示す。各試験体の圧縮強度のバラツキを考慮するため、ここでの  $\sigma_{n\text{-max}}$  は、各試験体の圧縮強度を用いて算出した。全体的な傾向として、 $R/C_1$  が大きくなるに伴い  $\sigma_{n\text{-multi-max}}/\sigma_{n\text{-max}}$  は増加した。また、 $\sigma_{n\text{-multi-max}}/\sigma_{n\text{-max}}$  と  $R/C_1$  の間には、最小かぶり厚によらず一義的な線形関係が認められた。図-11 より、 $\sigma_{n\text{-multi-max}}$  は  $\sigma_{n\text{-max}}$  と比べて  $R/C_1 = 1.00$  の時では約 20% 低下しており、 $R/C_1 = 1.50$  の時に両者は一致する傾向を示した。

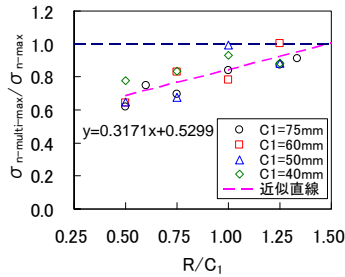


図-11  $\sigma_{n\text{-multi-max}}/\sigma_{n\text{-max}}$  と  
 $R/C_1$  の関係

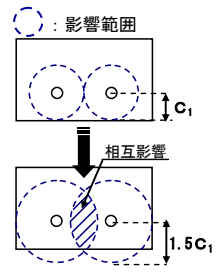


図-12 腐食膨張圧  
の影響範囲

このことから図-12 に示すように、腐食膨張圧のコンクリート部への影響範囲は、仮定していた最小かぶり厚を半径とした円の領域よりも大きく、最小かぶり厚の約 1.5 倍を半径とした円の領域まで及ぶと考えられる。

#### (3) 最小かぶり面のひび割れ幅の影響

図-13 に、一例として  $C_1 = 75\text{mm}$  における  $\sigma_{n\text{-multi-max}}$  を示した時点からの拘束圧と最小かぶり面の平均ひび割れ幅の関係を示す。図中には、式(3)に示す著者が提案した、単独の腐食膨張圧に対するコンクリートの拘束圧 (単鉄筋拘束圧) とかぶり面のひび割れ幅の関係を実線で示した<sup>1)</sup>。

$$\begin{aligned} \sigma_n &= \exp(-\alpha \cdot W_{cr}) \cdot \sigma_{n\text{-max}} \\ \sigma_{n\text{-max}} &= 0.1916C_1 + 0.1076f'_c - 6.1043 \\ \alpha &= (-0.5376 \ln C_2 + 2.7589) \cdot f'_c{}^{2/3} \\ (40 \leq C_1 \leq 75 \quad 40 \leq C_2 \leq 75, \quad 22.6 \leq f'_c \leq 55.6) \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 $\sigma_n$ : 単鉄筋拘束圧 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )、 $\alpha$ : 係数、 $W_{cr}$ : ひび割れ幅 (mm)、 $\sigma_{n\text{-max}}$ : 単鉄筋最大拘束圧 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )、 $C_1$ : 最小かぶり厚 (mm)、 $C_2$ : 横かぶり厚 (mm)、 $f'_c$ : 圧縮強度 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ ) である。

全体的な傾向として、 $\sigma_{n\text{-multi}}$  は  $R/C_1$  が大きくなるに伴い単鉄筋拘束圧に近づく傾向にあった。これは、 $R/C_1$  が大きいほど拘束圧に及ぼす各膨張圧の相互影響が小さくなるためであると考えられる。このような傾向は他のかぶり厚においても同様であった。

図-14 に  $\sigma_{n\text{-multi-max}}$  により正規化した  $\sigma_{n\text{-multi}}$  と平均ひび割れ幅の関係を示す。図中には、単鉄筋拘束圧の結果を実線で示した。全体的な傾向として、 $\sigma_{n\text{-multi-max}}$  に対する  $\sigma_{n\text{-multi}}$  の割合は  $R/C_1$  の影響をあまり受けず、また、単鉄

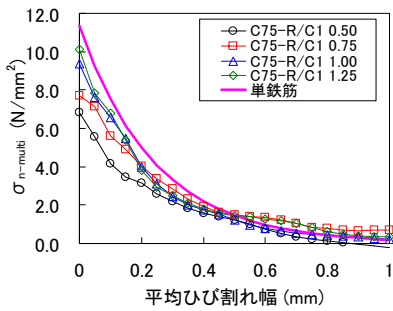


図-13  $\sigma_{n-multi}$  と平均ひび割れ幅の関係 ( $C_1=75\text{mm}$ )

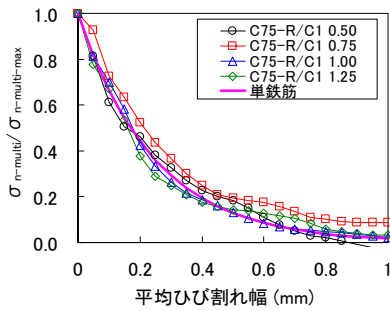


図-14 低下率と平均ひび割れ幅の関係 ( $C_1=75\text{mm}$ )

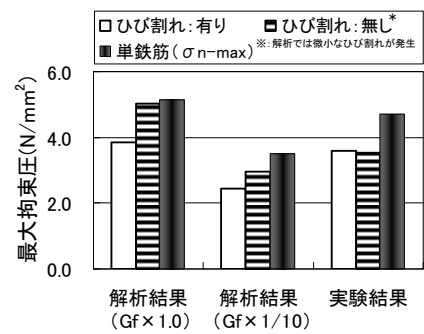


図-16 事前解析結果

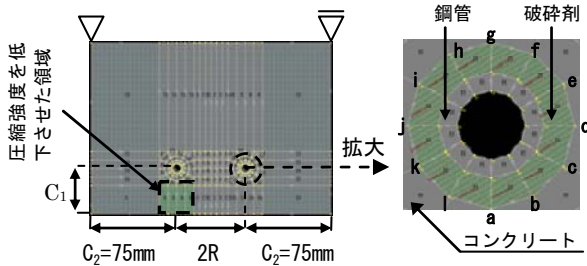


図-15 解析モデル

表-3 コンクリートの物性値

試験体名	かぶり(mm)		円孔間隔 2R (mm)	R/C <sub>1</sub>	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )	破壊エネルギーG <sub>f</sub> (N/m)
	縦:C1	横:C2					
C40-R/C <sub>1</sub> 0.50	40	75	40	0.50	29.0	29792	6.3
C40-R/C <sub>1</sub> 0.75			60	0.75			
C40-R/C <sub>1</sub> 1.00			80	1.00			
C40-R/C <sub>1</sub> 1.25			100	1.25			
C40 単鉄筋			-	-			

筋拘束圧と比べて顕著な差異がない。このような傾向は他のかぶり厚においても同様であった。このことは、単鉄筋拘束圧の低下割合は最小かぶり厚の影響を受けないことが既往の研究<sup>1)</sup>により明らかになっていることに立脚すれば、最小かぶり面の平均ひび割れ幅の拡大に伴う $\sigma_{n-multi}$ の低下割合は、単鉄筋拘束圧と同様であり、最小かぶり厚、 $R/C_1$ の影響を受けないと考えられる。

したがって $\sigma_{n-multi}$ は、式(3)に示した単鉄筋拘束圧と同様な指数型の関数でモデル化可能であり、 $\sigma_{n-multi-max}$ を定量化することで $\sigma_{n-multi}$ は評価可能であると考えられる。なお、 $\sigma_{n-multi-max}$ は図-11の関係をを用いることで定量化可能であると考えられる。

#### 4. 各鋼管に作用する最大拘束圧の解析的検討

3.1 節で述べた通り、各鋼管に作用する拘束圧は、同一 $R/C_1$ においてもひび割れ性状によって大きく異なる。例えば、片側ひび割れの場合は鋼管軸(円孔軸)上にひび割れが発生しない方が、両側ひび割れの場合は鋼管軸(円孔軸)上にひび割れが遅延して発生した方が、最大拘束圧は大きく、かつ $\sigma_{n-max}$ を上回るケースがある。このような傾向は他のかぶり厚についてもみられた。

そこで、二次元 FEM 解析による再現解析を実施し、上述のような実験結果の原因について検討した。

##### (1) 解析モデル

解析は、非線形解析ソフト ATENA(Ver.4.2.2)を用いた。解析モデルを図-15に示す。本解析では静的破砕剤を熱膨張させることで膨張圧を発生させることとした。その際、静的破砕剤の線膨張係数は $12\mu/\text{C}$ とし、コンクリートおよび鋼管パイプの線膨張係数は $0\mu/\text{C}$ とした。また、1ステップあたりの温度増分量は $1\text{C}$ とした。解析パラメータおよびコンクリートの物性値は、表-3に示す通りである。

コンクリートの引張側の構成則は、ひび割れが発生する以前は線形弾性とし、ひび割れ発生後は Hordijk によって提案された指数関数型のひび割れ開口則を用いた<sup>4)</sup>。また、破壊エネルギーは式(4)より算出した。

$$G_f = 0.000025 \left[ 0.24 \left( \frac{f'_c}{0.85} \right)^{\frac{2}{3}} \right] \times 10^6 \quad (4)$$

ここで、 $G_f$ : 破壊エネルギー (N/m) である。

また、特定のかぶり面に先行してひび割れを発生させるため、図-15に示す領域のコンクリートの圧縮強度を10%低下させた。

静的破砕剤の弾性係数は既往の研究<sup>2)</sup>を参考に $4200\text{N/mm}^2$ とし、鋼管の弾性係数は $200000\text{N/mm}^2$ とした。

式(4)の破壊エネルギーを用いて C40-R/C<sub>1</sub>0.50 試験体の事前解析を行った。図-16に示すように、ひび割れ無し側の最大拘束圧はひび割れ有り側の最大拘束圧と大きな差異が生じるとともに、その大きさは単鉄筋の場合の最大拘束圧( $\sigma_{n-max}$ )と同程度であった( $G_f \times 1.0$ )。この要因としては、膨張剤とコンクリートの界面を完全結合としたことで、ひび割れ有り側において拘束圧のひび割れ幅の拡大に伴う低下量が小さかったためであると考えられる。

したがって、ひび割れ幅の拡大に伴う拘束圧の低下を定量的に評価するためには、膨張剤とコンクリートの界面のすべりを考慮する必要があるが、本解析では破壊エネルギーを式(4)より算出される値の1/10倍の値とし、かぶり面のひび割れ幅の拡大に伴う膨張圧(拘束圧)の低下量を大きくした。図-16に示すように解析結果( $G_f \times 1/10$ )と実験結果は概ね同様な傾向を示した。これ

より、破壊エネルギーは式(4)より算出される値の 1/10 倍とした。

## (2) 解析結果

全ての試験体において、最小かぶり面にひび割れが卓越して進行した。最小かぶり面のひび割れ発生本数は、いずれの試験体も 2 本であったが、 $R/C_1 < 1.00$  試験体では片側のひび割れが顕著に拡大した。

また、 $R/C_1 < 1.00$  試験体では円孔間に水平ひび割れが貫通し、 $R/C_1 \geq 1.00$  試験体では円孔間に水平ひび割れはほとんど発生しなかった。

図-17 に解析結果を示す。解析値は、ひび割れ後発側の最大拘束圧が、先発側に比べて大きく、また  $R/C_1$  によっては  $\sigma_{n-max}$  を上回る場合があり、実験結果を定性的に評価できている。

図-18 に最小かぶり面にひび割れが発生する前後における静的破砕剤とコンクリートとの界面の各節点に作用する膨張圧を示す。最小かぶり面にひび割れが発生する直前 (step70) まで膨張圧は等方的に作用している。その後、かぶり面にひび割れが発生 (step70 以降) すると、ひび割れ先発側 (図 18-(a)) の膨張圧は減少する。一方、ひび割れ後発側 (図 18-(b)) の膨張圧は、節点 a, l, h, g では減少するが、それ以外の節点では最小かぶり面にひび割れが発生するまで (step170)、拘束圧は増加する傾向を示した。このように、かぶり面にひび割れが発生した後の膨張挙動が、等方的から異方的に増加する傾向に変化することによって、ひび割れ後発側の最大拘束圧は  $\sigma_{n-max}$  を上回ったと考えられる。

## 5. 結論

本研究は、静的破砕剤を用いた複数鉄筋腐食膨張模擬実験および二次元 FEM 解析を行い、複数の鉄筋腐食膨張圧がコンクリートの拘束圧に及ぼす影響評価を行った。本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 本実験の範囲内では、いずれの試験体も最小かぶり面にひび割れが卓越して進行した。また、ひび割れ発生のパターンは、片側ひび割れと、両側ひび割れの 2 つに分けられ、その閾値は  $R/C_1 = 1.00$  であった。
- (2) 本実験の範囲内では、 $\sigma_{n-multi-max}$  は最小かぶり厚が同じ  $\sigma_{n-max}$  と比べて小さくなった。また、 $\sigma_{n-multi-max}$  は  $R/C_1$  が大きくなるに従って、最小かぶり厚が同じ  $\sigma_{n-max}$  に漸近する傾向を示した。
- (3)  $\sigma_{n-multi-max}/\sigma_{n-max}$  と  $R/C_1$  の間には、最小かぶり厚によらず一義的な線形関係が確認された。また、腐食膨張圧のコンクリート部への影響範囲は、最小かぶり厚の約 1.5 倍を半径とした円の領域まで及ぶと考えられる。

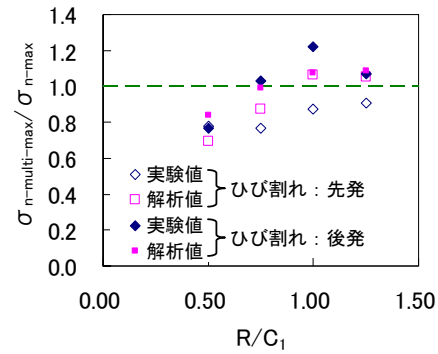


図-17 解析結果

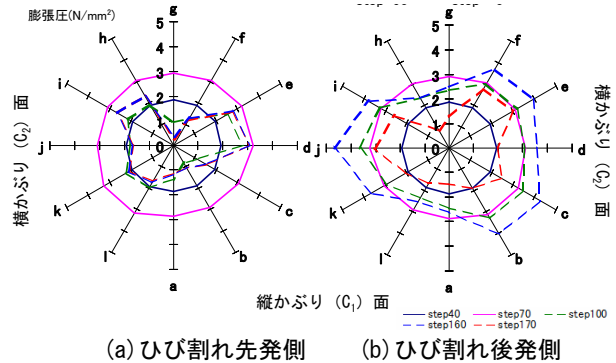


図-18 各節点の膨張圧 (C40-R/C<sub>1</sub>0.75)

- (4) 本実験の範囲内では、 $\sigma_{n-multi-max}$  により正規化した  $\sigma_{n-multi}$  と最小かぶり面の平均ひび割れ幅の関係は、最小かぶり厚、 $R/C_1$  の影響を受けず、単鉄筋拘束圧の場合と同様であると考えられる。
- (5) 各鋼管に作用する拘束圧の最大値、および最小かぶり面のひび割れ幅の拡大に伴う低下割合は、ひび割れ性状および、ひび割れ発生過程が大きく影響する。

謝辞 本研究の一部は、ユニオンツール育英奨学会の研究助成を受けたものである。

## 参考文献

- 1) 長岡和真, 佐藤綾桂, 村上祐貴: 鉄筋腐食を生じた RC 部材の付着応力性状に及ぼすコンクリートの拘束度の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.827-832, 2011
- 2) 原田哲夫, 福田孝一, 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, 1993.11
- 3) 田森清美, 丸山久一, 小田川昌史, 橋本親典: 鉄筋発錆によるコンクリートのひび割れ性状に関する基礎研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.10, No.2, pp.159-166, 1996
- 4) Hordijk, D. A. : Local Approach to Fatigue of Concrete, Doctor dissertation, Delft University of Technology, 1991