

# 論文 破砕剤充填パイプにより腐食ひび割れを模擬した RC 柱の中心圧縮性状

山野 登梧\*1・金久保 利之\*2・Syll Amadou Sakhir\*3

**要旨:** 鉄筋の腐食膨張によって発生するコンクリートのひび割れが RC 部材の圧縮性状に及ぼす影響に着目し、静的破砕剤充填パイプによりひび割れを模擬した RC 柱の中心圧縮試験を行った。破砕剤を充填したパイプを用いるとコンクリートにひび割れが発生し、経過時間の増大にともなってひび割れ幅も大きくなる傾向がみられた。中心圧縮試験の結果、加力前のひび割れ状況と最大応力に明瞭な関係は確認できなかった。加力前ひび割れ幅が 0.3mm 以上のひび割れの長さを用いて既往の研究で提案された式でコンクリートの軟化勾配を示す係数を求めると、概ね実験結果を評価できた。

**キーワード:** ひび割れ幅、ひび割れ長さ、静的破砕剤、鉄筋腐食、中心圧縮、Popovics モデル

## 1. はじめに

1960 年代に始まった建設ラッシュによって、現存する多くの鉄筋コンクリート（以下 RC）造構造物が建設から 40～50 年以上経過し、塩害や中性化など、環境要因や経年劣化による性能低下が危惧されている。性能低下の一つとして鉄筋腐食が挙げられる。現在までに、引張鉄筋の腐食が RC 部材の性能低下に及ぼす影響に関する研究は多くなされている一方で、コンクリートのひび割れが性能低下に及ぼす影響に着目した研究は少ない。

既往の研究<sup>1)</sup>により、電食による鉄筋腐食でコンクリートにひび割れが生じた RC 試験体の中心圧縮性状は健全試験体よりも最大応力が低下する傾向がみられたが、コンクリート表面でのひび割れの長さや最大応力以降の応力低下について明瞭な関係は見られなかったことが報告されている。一方、ひび割れをスリットにより模擬した試験体では<sup>2)</sup>、スリットの長さ（＝ひび割れ長さ）と破壊の局所化が、応力歪曲線の軟化域に影響を及ぼすことが報告されている。鉄筋腐食によるコンクリートのひび割れが RC 部材の圧縮性状に及ぼす影響を評価するためには、さらなるデータの蓄積が必要であると考えられる。

著者らは、鉄筋腐食によるコンクリートのひび割れ性状を模擬する方法として、コンクリート中に埋設した中空パイプに静的破砕剤を充填し、腐食生成物による場合と同様の内圧によってひび割れを生じさせ、実験を行う手法を試みている<sup>3)</sup>。本手法では電食と比較して短期間でひび割れを生じさせることが可能で、さらに、破砕剤充填後の経過時間によって目標とするひび割れ幅を設定することができる。破砕剤充填パイプを圧縮鉄筋の代わ

りに用いた RC 梁試験体の実験<sup>4)</sup>では、充填後 300 時間経過後の試験体の平均ひび割れ幅は 0.5～1mm であった。

本研究では、破砕剤充填パイプを用いて鉄筋腐食によるひび割れを模擬した RC 柱の中心圧縮試験を行い、コンクリートのひび割れが RC 柱の中心圧縮性状へ及ぼす影響を検討し、特に応力歪曲線の軟化域に関して既往の結果<sup>2)</sup>と比較することを目的とする。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体

試験体一覧を表-1 に、試験体配筋を図-1 に示す。試験体は全 15 体である。断面は 250mm×250mm で、試験体中央部 250mm を試験区間とした。

表-1 試験体一覧

No.	試験体名	パイプ 外径 (mm)	本数	充填後経過 時間 (h)	
1	P18-N4-T15	18	4	15	
2	P18-N4-T65			65	
3	P18-N4-T300			300	
4	P18-N8-NF		8	8	充填なし
5	P18-N8-T15				15
6	P18-N8-T65				65
7	P18-N8-T300				300
8	P22-N4-NF	22	4	充填なし	
9	P22-N4-T15			15	
10	P22-N4-T65			65	
11	P22-N4-T300		300		
12	P22-N8-NF		8	8	充填なし
13	P22-N8-T15				15
14	P22-N8-T65				65
15	P22-N8-T300				300

\*1 筑波大学 理工学群 工学システム学類 (学生会員)

\*2 筑波大学 システム情報系教授 博士 (工学) (正会員)

\*3 筑波大学大学院 システム情報工学研究科

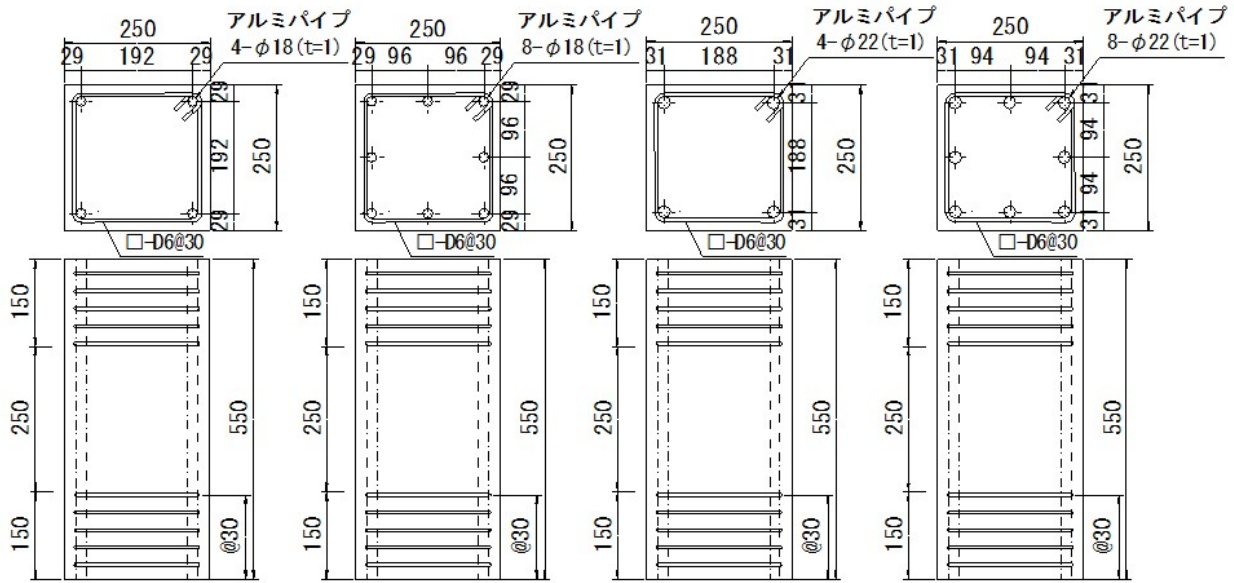


図-1 試験体配筋図

主筋位置に外径 18mm または 22mm のアルミパイプを配置し、コンクリート打設後 4 週以降に静的破砕剤を充填する。試験体両端部については帯鉄筋(D6@30)を配し補強している。変動因子はパイプの外径および本数、破砕剤充填から加力開始までの経過時間である。経過時間は先行研究<sup>3)</sup>に倣い、15, 65, 300 時間とした。これらの経過時間は、発生ひび割れの大小の違いを想定したものである。

## 2.2 材料試験結果

### (1)コンクリート

コンクリートには、目標強度を 18MPa とした最大骨材寸法 20mm の普通コンクリートを用いた。同一バッチのコンクリートを用い、試験体上部から打設を行った。中心圧縮加力時材齢にあわせて、3 回のシリンダーテストピースによる圧縮強度試験を行った。それらの結果を表-2 に示す。

### (2)アルミパイプ

破砕剤充填用パイプには、外径 18mm または 22mm、肉厚 1mm のアルミパイプを用いた。アルミパイプ単体の引張試験結果を表-3 に示す。周方向歪も計測し、ポアソン比も求めた。3 体の引張試験の平均値を示している。

## 2.3 加力および計測方法

加力方法および変位計の取付け状況を図-2 に示す。加力には 2MN 万能試験機を用いて一方向単調圧縮荷重を行った。軸変形測定用として、試験区間部分にπ型変位計および加力版に鉛直変位計を設置し、およそ 3mm の変形(歪で 1.2%)まではπ型変位計の測定値を軸変形量とし、それ以降はπ型変位計を取り外して、そのステップにおける鉛直変位計とπ型変位計の測定値の差分を鉛直

表-2 コンクリート材料試験結果

材齢(日)	圧縮強度(MPa)	弾性係数(GPa)
41	19.2	25.2
47	16.7	23.4
51	17.6	22.9
平均	17.7	23.7

表-3 アルミパイプ引張試験結果

種別 外径	引張強度 (MPa)	降伏強度* (MPa)	弾性係数 (GPa)	ポアソン 比
18mm	230	211	66.9	0.342
22mm	218	198	64.3	0.333

\* : 0.2%オフセット耐力

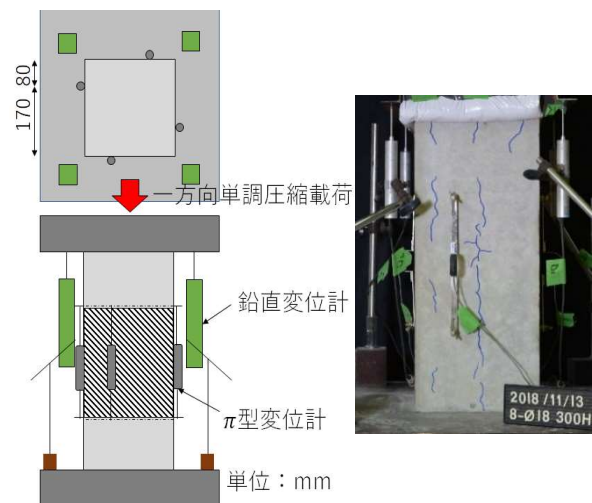


図-2 加力方法および変位計取付け状況

変位計の測定値から差し引くことによって軸方向変形量とした。

### 3. 実験結果

#### 3.1 破砕剤充填によるひび割れ発生状況

加力前における試験体のひび割れ発生状況の例を図-3に、各試験体の加力前最大ひび割れ幅および平均ひび割れを表-4に示す。ひび割れ幅はパイプに沿って生じたひび割れについてクラックスケールを用いて計測した。いずれの試験体においても、破砕剤の充填によってパイプに沿ったひび割れが生じた。経過時間が大きい試験体ほど最大ひび割れ幅、平均ひび割れ幅ともに大きくなり、両者の差が広がる傾向がみられた。パイプ本数とひび割れ幅の間に明瞭な関係は確認できなかった。破砕剤充填後の経過時間の増大にもなって発生ひび割れは長くなり、本数も増した。さらに、パイプの外径が大きいとひび割れ幅が大きくなる傾向がみられた。破砕剤充填後経過時間による試験体の最大ひび割れ幅の推移を図-4に示す。いずれの試験体においても破砕剤充填後経過時間が50hまではひび割れ幅の推移の傾向が似ている。それ以降は、パイプ外径18mmの試験体は緩やかにひび割れ幅が増加し、外径22mmの試験体は急にひび割れ幅が拡大している傾向がみられた。

#### 3.2 加力後の破壊状況

中心圧縮加力終了後の試験体の状況を図-5に示す。いずれの試験体においてもかぶりコンクリートの剥落、アルミパイプの座屈、コアコンクリートの損傷が見られた。パイプが4本の試験体では試験体の斜め方向にひび

表-4 実験結果一覧

試験体名	加力前ひび割れ幅 (mm)		最大応力 (MPa)	最大応力 時の歪 (%)
	最大	平均		
P18-N4-T15	0.08	0.05	14.56	0.257
P18-N4-T65	0.20	0.07	14.61	0.272
P18-N4-T300	0.40	0.20	15.41	0.262
P18-N8-NF	-	-	15.12	0.238
P18-N8-T15	0.10	0.05	14.93	0.197
P18-N8-T65	0.20	0.07	15.38	0.205
P18-N8-T300	0.40	0.07	15.25	0.253
P22-N4-NF	-	-	15.06	0.257
P22-N4-T15	0.05	0.05	14.89	0.300
P22-N4-T65	0.30	0.18	15.69	0.279
P22-N4-T300	0.90	0.58	14.50	0.183
P22-N8-NF	-	-	16.03	0.206
P22-N8-T15	0.05	0.05	15.66	0.228
P22-N8-T65	0.30	0.16	15.72	0.257
P22-N8-T300	0.80	0.25	16.00	0.298

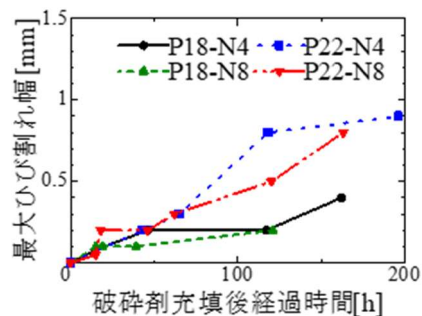
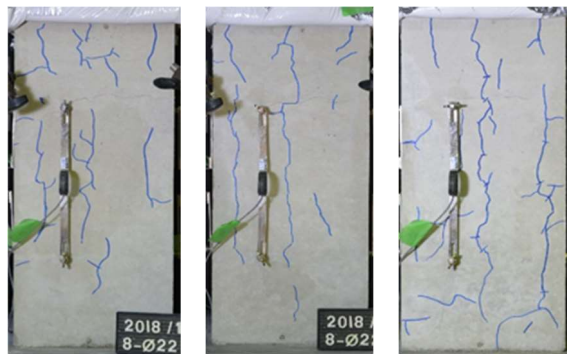


図-4 充填後経過時間と最大ひび割れ幅の関係

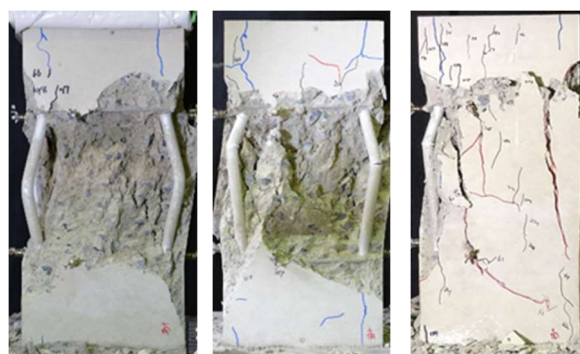


P18-N4-T15 P18-N4-T65 P18-N4-T300

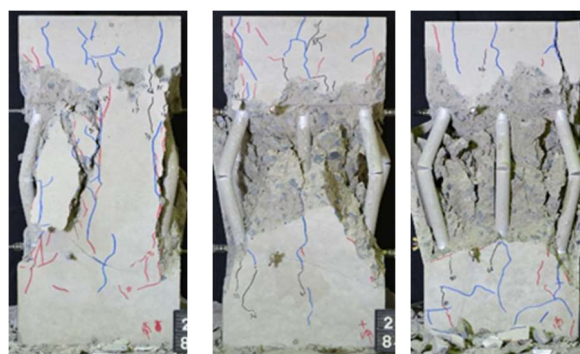


P22-N8-T15 P22-N8-T65 P22-N8-T300

図-3 加力前の試験体例



P18-N4-T15 P18-N4-T65 P18-N4-T300



P22-N8-T15 P22-N8-T65 P22-N8-T300

図-5 加力後の試験体例

割れが入り、8本の試験体ではパイプに平行なひび割れが入る傾向が見られた。パイプの外径が22mmの試験体はパイプの座屈に加え、パイプの一部に亀裂が入る傾向が見られた。破砕剤充填後経過時間の違いによる試験体の破壊状況に差異は見られなかった。

### 3.3 最大応力と加力前ひび割れ幅の関係

各試験体の中心圧縮時最大応力および最大応力時の歪の値を表-4に示した。加力前ひび割れ幅と最大応力の関係を図-6に示す。応力は圧縮荷重を試験体全断面(250mm×250mm)で除し、歪は軸変形を試験区間長さ(250mm)で除して求めた。加力前最大ひび割れ幅および平均ひび割れ幅ともに最大応力との明瞭な関係は確認できなかった。パイプ外径22mmの試験体の最大応力が18mmの試験体よりも大きい傾向がみられ、破砕剤充填パイプによる圧縮力負担の影響によるものと考えられる。

### 3.4 応力-歪関係

各試験体の応力-歪関係を図-7に示す。また、最大応力以降の軟化勾配に着目するために、各試験体の最大応力および最大応力時の歪で基準化した曲線を図-8に示す。P18-N4試験体間ではあまり明瞭でないが、それ以外の因子の試験体間では破砕剤充填後経過時間が長いほど軟化勾配が緩やかになっている傾向が確認できる。

## 4. コンクリートの軟化勾配の検討

### 4.1 軟化勾配算出方法

コンクリートの軟化勾配を検討するために、後述する破砕剤充填パイプの圧縮応力-歪モデルを用い、平面保持の仮定の下、実験値から破砕剤充填パイプ負担分の荷重を差し引き、コンクリート負担分の荷重を算出した。さらに、コンクリートの基準化応力-基準化歪関係を、先行研究<sup>2)</sup>と同様に式(1)に示すPopovicsモデル<sup>3)</sup>を用いて近似し、曲線の形状係数 $n$ を求めた。

$$\frac{\sigma}{\sigma_c} = \frac{n(\varepsilon/\varepsilon_c)}{n-1+(\varepsilon/\varepsilon_c)^n} \quad (1)$$

ここで、 $\sigma_c$ :最大応力(MPa)、 $\varepsilon_c$ :最大応力時の歪

$n$ :曲線形状係数

### 4.2 破砕剤充填パイプの圧縮応力-歪モデル

本研究で用いた破砕剤充填パイプの圧縮試験が文献<sup>3)</sup>で行われている。使用されたパイプの径、厚は本研究と同一で、破砕剤の充填状況および充填から加力開始までの経過時間も本研究と同一である。破砕剤充填パイプ単体とコンクリート中の同パイプの圧縮挙動は同一であると考えて、モデル化を行う。破砕剤充填パイプの圧縮試験結果を図-9に示す。最大点までを式(2)に示す放物線、軟化域を式(3)に示す直線でモデル化することとした。

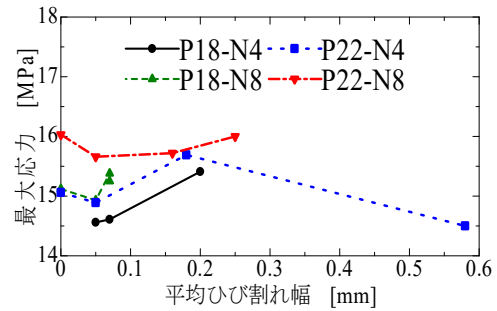
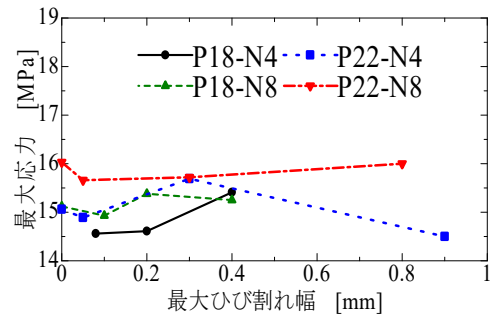


図-6 加力前ひび割れ幅と最大応力の関係

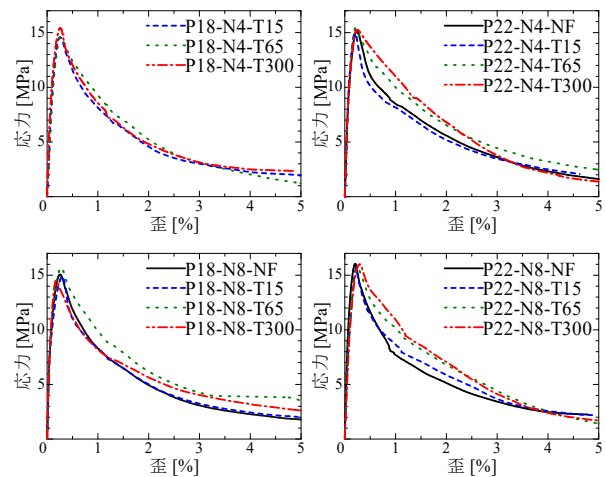


図-7 応力-歪関係

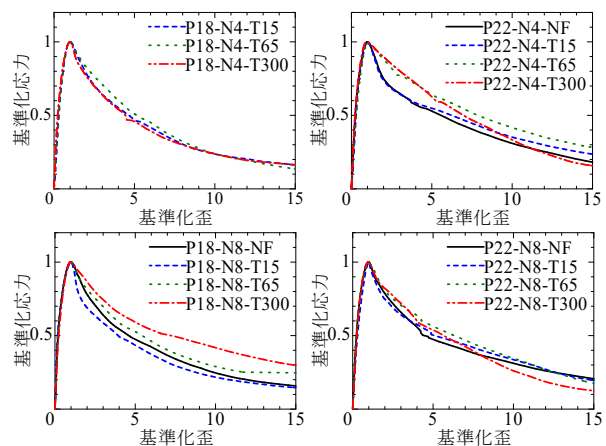


図-8 基準化応力基準化歪関係

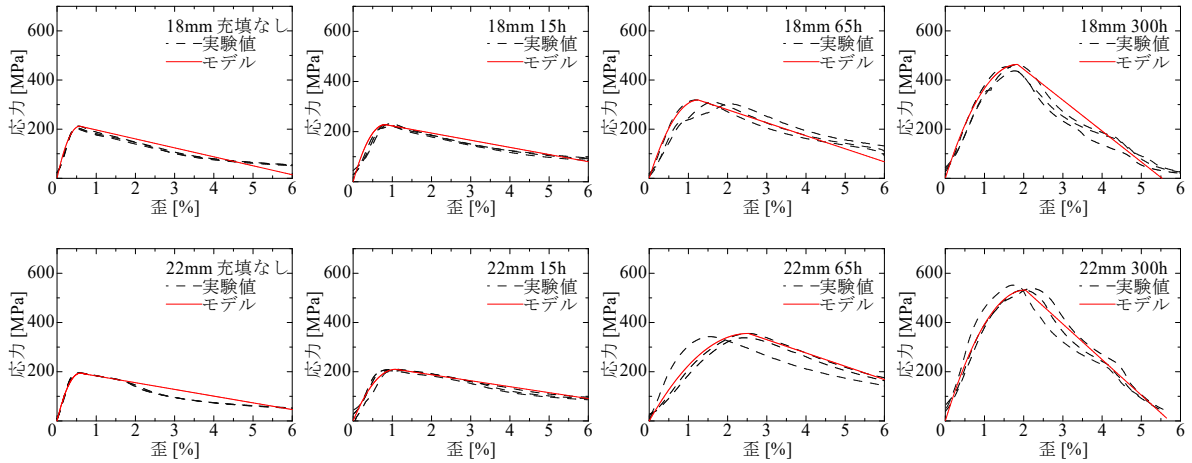


図-9 破砕剤充填パイプ圧縮試験結果

最大応力および最大応力時の歪は各因子3体の試験結果の平均値を用い、各試験体の軟化直線の勾配を最小二乗法で求めた。軟化勾配を表す係数  $m$  の一覧を表-5に、モデルの例を図-9に示す。

$$\sigma_p = \sigma_{max} \{ 2\varepsilon/\varepsilon_{max} - (\varepsilon/\varepsilon_{max})^2 \} \quad (2)$$

$$\sigma_p = \sigma_{max} \left( 1 - \frac{\varepsilon - \varepsilon_{max}}{2m\varepsilon_{max}} \right) \quad (3)$$

ここで、 $\sigma_{max}$ :最大応力、 $\varepsilon_{max}$ :最大応力時の歪  
 $m$ :軟化勾配を表す係数

#### 4.3 コンクリートの軟化勾配

パイプ負担分の荷重を差し引いたコンクリート負担分の最大応力を表-6に示す。コンクリート負担分の最大応力に関しても図-6と同様に、加力前ひび割れ幅と最大応力に明瞭な関係は確認できなかった。コンクリートの基準化応力-基準化歪関係の例を図-10に、各試験体の  $n$  の一覧を表-6に示す。既往の研究<sup>2)</sup>では曲線形状係数  $n$  の範囲は1.75~3.48であることが報告されている。P18-T300の試験体を除いて、パイプの本数が多くなると  $n$  値が大きくなる、すなわち軟化勾配が大きくなる傾向がある。パイプの外径および破砕剤充填後経過時間の  $n$  値への明瞭な影響は確認できなかった。

加力前最大ひび割れ幅および平均ひび割れ幅と  $n$  値の関係を図-11に示す。P22-N8の試験体においてひび割れ幅が大きくなると  $n$  値が大きくなる傾向があるが、その他のシリーズの試験体については明瞭な関係を確認できなかった。既往の研究<sup>2)</sup>で検討に用いられたひび割れ長さ比と  $n$  値の一覧を表-7に示す。ひび割れ長さ比とは、ひび割れ長さの合計を試験区間長で除した値で、 $n$  値との関係が式(4)で提案されている。本研究の試験体に関して、試験区間長の半分以上の長さを有するひび割れが試験区間全体にあるものとし、ひび割れ本数をひび割れ長さ比とした  $n$  値の計算値と実験値の適合性はあまりよくなく、誤差が大きい。

表-5 破砕剤充填パイプモデルの  $m$  値一覧

パイプ 外径	充填後 経過時間	$m$ 値	パイプ 外径	充填後 経過時間	$m$ 値
18mm	充填なし	5.0	22mm	充填なし	6.0
	15h	4.9		15h	4.0
	65h	2.4		65h	1.3
	300h	1.0		300h	0.9

表-6 コンクリートの最大応力と  $n$  値一覧

試験体名 外径 18mm	最大応力 (MPa)	$n$ 値	試験体名 外径 22mm	最大応力 (MPa)	$n$ 値
-	-	-	P22-N4-NF	14.17	1.87
P18-N4-T15	14.20	1.99	P22-N4-T15	14.05	1.89
P18-N4-T65	14.49	1.90	P22-N4-T65	14.95	1.80
P18-N4-T300	15.04	2.02	P22-N4-T300	14.02	1.84
P18-N8-NF	14.66	1.93	P22-N8-NF	15.23	1.93
P18-N8-T15	14.71	2.13	P22-N8-T15	15.13	2.03
P18-N8-T65	15.21	1.91	P22-N8-T65	15.28	2.00
P18-N8-T300	14.82	1.87	P22-N8-T300	14.96	2.23

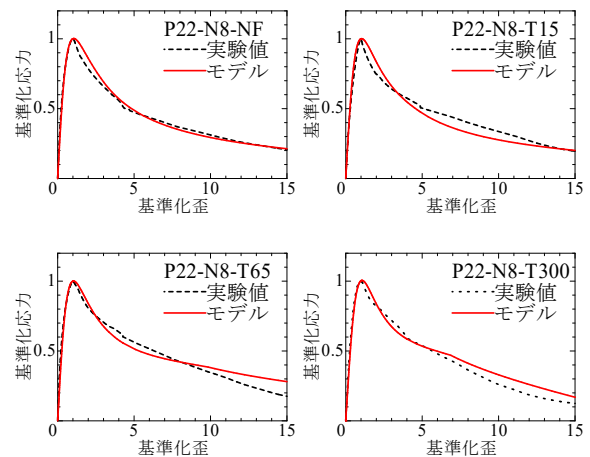


図-10 近似結果例

表-7 ひび割れ長さ比と n 値

試験体名	n 実験値	ひび割れ長さ比	n 計算値	誤差(%)	ひび割れ長さ比 (0.3mm 以上)	n 計算値	誤差(%)
P18-N4-T15	1.99	2	2.07	4	0	1.81	9
P18-N4-T65	1.90	4	2.33	23	0	1.81	5
P18-N4-T300	2.02	6	2.59	28	1	1.94	4
P18-N8-NF	1.93	0	1.81	6	0	1.81	6
P18-N8-T15	2.13	2	2.07	3	0	1.81	15
P18-N8-T65	1.91	8	2.85	50	0	1.81	5
P18-N8-T300	1.87	7	2.72	46	0	1.81	3
P22-N4-NF	1.87	0	1.81	3	0	1.81	3
P22-N4-T15	1.89	-	-	-	0	1.81	4
P22-N4-T65	1.80	6	2.59	44	2	2.07	15
P22-N4-T300	1.84	6	2.59	41	4	2.33	27
P22-N8-NF	1.93	0	1.81	6	0	1.81	6
P22-N8-T15	2.03	5	2.46	21	0	1.81	11
P22-N8-T65	2.00	10	3.11	56	2	2.07	4
P22-N8-T300	2.23	12	3.37	51	6	2.59	16

$$n = \frac{0.13(L_{cr}/L)+1.81}{(L_f/L)^{0.84}} \quad (4)$$

ここで、n:曲線形状係数,  $L_{cr}$ :ひび割れ長さ(mm)

L:試験区間長(mm),  $L_f$ :破壊域長さ(mm)

本実験では局所破壊がないものと仮定( $L_f/L = 1$ )

式(4)が提案された実験ではひび割れの模擬方法として厚さ 0.5mm のポリプロピレンシートが用いられている。そこで、加力前ひび割れ幅が 0.3mm 未満のひび割れの影響は大きくないものと考え、ひび割れ幅が 0.3mm 以上で試験区間長の半分に達しているひび割れ本数をひび割れ長さ比として n 値を求めた。計算結果と実験値との誤差を表-7 に示した。ひび割れ幅 0.3mm 未満のひび割れを除いた場合の計算値の方が誤差は小さくなった。

## 5. まとめ

破砕剤充填パイプを用いて腐食ひび割れを模擬した RC 柱の中心圧縮試験を行い、コンクリートのひび割れが RC 柱の圧縮性能に及ぼす影響を検討した。本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 破砕剤充填後の経過時間の増大にともなって発生ひび割れ幅は長くなり、ひび割れ幅も大きくなる傾向がみられた。
- (2) 加力前のひび割れ状況と中心圧縮載荷時の最大応力に明瞭な関係は確認できなかった。
- (3) 加力前ひび割れ幅、ひび割れ本数、ひび割れ長さのいずれも、コンクリートの軟化勾配と明瞭な関係は確認できなかった。
- (4) 加力前ひび割れ幅が 0.3mm 以上のひび割れの長さを用いて既往の研究で提案された式でコンクリートの軟化勾配を示す形状係数を求めると、概ね実験結果を評価できた。

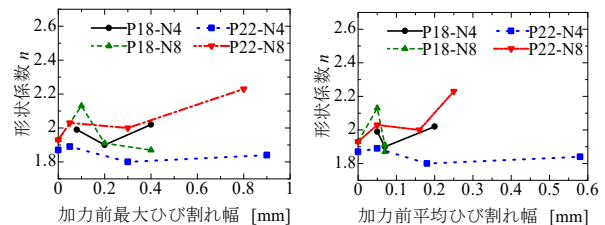


図-11 ひび割れ幅と n 値の関係

## 謝辞

本研究は、JSPS 科研費挑戦的研究(萌芽) 17K18917 によっている。

## 参考文献

- 1) 藻川哲平, 金久保利之, 八十島章, 大屋戸理明: 鉄筋腐食によってひび割れが生じた RC 柱の中心圧縮性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.2, pp.145-150, 2017.7
- 2) 藻川哲平, 八十島章, 金久保利之, 大屋戸理明: 鉄筋腐食によるひび割れを模擬した RC 柱の中心圧縮性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.2, pp.151-156, 2016.7
- 3) Syll, A. S., Kawamura, Y., Kanakubo, T., Simulation of Concrete Cracks due to Bar Corrosion by Aluminum Pipe Filled with An Expansion Agent, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Structure IV, pp.55-56, 2018.9
- 4) 川村佳弘, 金久保利之: 破砕剤充填パイプにより鉄筋腐食時ひび割れを模擬した RC 梁部材の曲げ性状, 土木学会関東支部技術研究発表会, V-22, 2018.3
- 5) Popovics, S, A Numerical Approach to the Complete Stress - Strain Curve of Concrete, Cement and Concrete Research, Vol.3, pp.583-599, 1973