

# 曲げモーメントを受けるプレストレストコンクリート 床スラブのひび割れ間隔に関する研究

後藤 光、岡本 晴彦

プレストレストコンクリート構造のうち、ひび割れを許容するものについては、ひび割れ幅制御を行わなければならない。その設計における代表的な指針として PRC 指針（「日本建築学会プレストレスト鉄筋コンクリート（Ⅲ種 PC）構造設計・施工指針・同解説」）がある。この中で精度よく曲げひび割れ幅を算定するためには、平均鉄筋ひずみおよび平均ひび割れ間隔がキーポイントとなる。本研究ではこのうちひび割れ間隔に着目をし、また PRC 指針によるひび割れ幅算定における床スラブへの適用性の検討が十分でないことから、これを対象として研究を行った。さらに、ひび割れ性状を捉える方法として部材の有効引張域モデルを考える方法があり、本研究では有効引張域の高さと全せいの関係に焦点を当て、これらの目的に沿った試験体製作を行い、実験、考察を遂行した。

## 1. 序

建築構造設計において鉄筋コンクリート（以下、RC）構造では、常時荷重作用時においては部材断面に配された鉄筋応力が制限値以下になるよう設計することにより、使用性及び安全性の確保を行っている。このときひび割れ幅について直接的に検討することは稀である。一方、プレストレストコンクリート（以下、PC）構造では、PC 鋼材を用いて部材にプレストレスを与えるため、RC 構造と比べ梁せいを低く抑えることや、長スパン化することが可能である。PC は設計において、ひび割れを許容するものとししないものに大きく分けられるが、ひび割れを許容するものについては、PC 鋼材の防錆の点からひび割れ幅を制御しなければならない。

## 2. 研究目的

### 2.1 有効引張域と全せい

図 2-1 に示すように、鉄筋コンクリート曲げ部材の下縁から引張鉄筋中心までの距離を 2 倍した距離をコンクリート下縁からとり、この部分を有効引張域としてモデル化し、ひび割れ性状を捉える方法がある。<sup>1)</sup>この場合、梁と床スラブを比較すると、有効引張域の高さ（以下、有効高さ）に対する全せいの割合が異なる。既往の研究ではこの割合とひび割れ間隔について言及したものは存在しないため、この点に特に着目をして研究を行った。

### 2.2 PRC 指針のひび割れ幅算定

プレストレストコンクリート構造において、ひび割れの発生を許す設計の代表的な指針として「プレストレスト鉄筋コンクリート（Ⅲ種 PC）構造設計・施工指針・同解説」<sup>1)</sup>（以下、PRC 指針）がある。

PRC 指針において曲げひび割れ幅を算定する際、平均ひび割れ間隔に平均鉄筋ひずみを乗ずることで平均ひび割れ幅を算定するものとしている。したがって精度良く平均ひび割れ幅を算定するためには、必然的に平均鉄筋ひずみ及び、平均ひび割れ間隔を精度良く求めなければならない。本研究ではひび割れ間隔に着目して研究を行った。

### 2.3 PRC 指針の床スラブへの適用

鉄筋コンクリート構造を含めたコンクリート系構造に対し PRC 指針のひび割れ幅制御設計を適用させることは可能であると考えられているが、適用性の検討は充分でない。その一つに、PRC 指針の曲げひび割れ幅算定方法の床スラブへの適用を対象とした既往の研究が少ないことが挙げられ、残された課題が多い。

## 3. 研究方法

### 3.1 試験体計画

床スラブは単位幅を持つ帯として捉えると梁に置き換えることが可能であるため、梁の形状の試験体により実験を行った。研究目的との関係から、試験体にはプレストレスを導入していない。試験体数は4体で、有効引張域を全試験体で同一とした。有効高さを70mmとし、全せいを105, 140, 175, 210mmとして採用した。このとき、全せいDと有効高さ $D_e$ の比は、 $D/D_e=1.5, 2.0, 2.5, 3.0$ である。

引張鉄筋はD10mmを用い、引張鉄筋比 $p_t$ は、それぞれ1.27, 0.85, 0.63, 0.51%である。せん断補強筋D6mmをせん断スパンに配している。また、本研究は曲げひび割れを対象として実験を行うため、材軸方向中央部500mmの試験区間には、ひび割れ幅及びひび割れ間隔に影響を与えないようにせん断補強筋を配していない。試験体表、試験体図をそれぞれ表3-1、図3-1に示す。

### 3.2 使用材料・試験体製作

コンクリートについては、普通ポルトランドセメントを使用し、公称圧縮強度を $33\text{N/mm}^2$ とした。水セメント比は62%である。主筋は、横ふし異形鉄筋D10mmを用いた。鋼種はSD295Aである。材料試験において、コンクリートについては、試験体載荷実験期間における強度増加を考慮して、試験体載荷実験直前と直後の2回に分けて材料試験を行った。コンクリート調査設計、コンクリート材料試験結果及び鉄筋材料試験結果をそれぞれ表3-2、3-3、3-4に示す。

コンクリート打設後は湿布に包み、ビニールシートで封緘養生を行った。養生は載荷開始1日ないし2日前まで実施した。

### 3.3 載荷方法・測定方法

載荷は図3-1に示すように、試験体を単純支持したうえで、載荷用鉄骨を介して2点載荷を行った。載荷には1000kN 万能試験機を用いた。

ひび割れ幅測定のため、載荷前に試験区間に検長100mmのパイ型変位計を試験体両側面に計12個設置した。このとき一方の側面をN面とし、もう一方の側面をS面とした。また、た

わみ測定のため、変位計を試験体材軸方向中央位置と載荷点位置の計3カ所に設置した。パイ型変位計測定位置図を図3-2に示す。

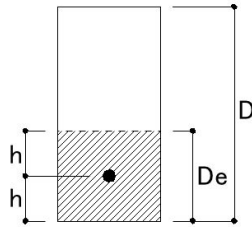


図2-1 全せいDと有効高さ $D_e$ の関係

表3-1 試験体表

試験体 No.		N11-105	N11-140	N11-175	N11-210
全せい	D(mm)	105	140	175	210
有効せい	d(mm)	70	105	140	175
有効高さ	$D_e$ (mm)	70			
$D/D_e$		1.5	2	2.5	3
全長	L(mm)	1090			
せん断スパン長さ	a(mm)	225			
試験区間	m(mm)	500			
試験区間試験体幅	b(mm)	80			
引張鉄筋径(断面積)	$a_t$ (mm <sup>2</sup> )	D10(71.3)			
コンクリート底面かぶり深さ	$c_b$ (mm)	30			
コンクリート側面かぶり深さ	$c_s$ (mm)	35			
引張鉄筋比	$p_t$ (%)	1.27	0.85	0.63	0.51
コンクリート公称圧縮強度	$F_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	33			

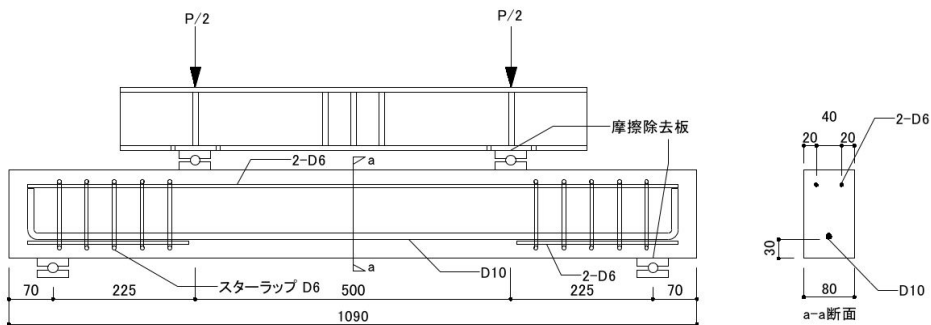


図3-1 試験体図・載荷方法図

表 3-2 コンクリート調合表

					単位質量(kg/m <sup>3</sup> )							
スランブ	空気量	粗骨材最大寸法	水セメント比	細骨材率	水	セメント	細骨材1	細骨材2	粗骨材	減水剤	AE剤	
(cm)	(%)	(mm)	(%)	(%)	W	C	S1	S2	G	AD	AE	
15	4.5	13	62	50.1	168	271	659	273	928	2.71	0.005	

表 3-3 コンクリート材料試験結果

	圧縮強度	割線弾性係数	割裂強度
	N/mm <sup>2</sup>	$E_{1/3} \times 10^4$ (N/mm <sup>2</sup> )	N/mm <sup>2</sup>
載荷前	31.78	2.79	3.14
載荷後	32.35	2.99	2.85
平均値	32.07	2.89	2.99

表 3-4 鉄筋引張試験結果

	降伏強度 $\sigma_y$	引張強さ $\sigma_u$
	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>
No.1	366.9	527.5
No.2	371.8	519.7
No.3	370.4	519.7
平均	369.7	522.3

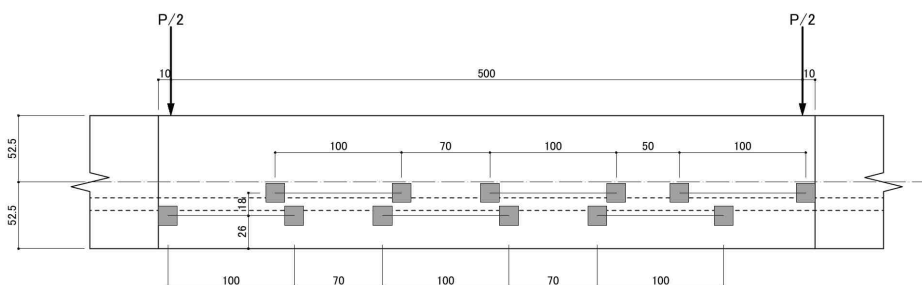


図 3-2 パイ型変位計設置図

## 4. 実験結果と考察

### 4.1 PRC 指針による平均ひび割れ間隔算定

PRC 指針によって平均ひび割れ幅を算定する際、平均ひび割れ間隔は以下のように求めることができる。

$$l_{av} = 2(c+s/10) + \kappa \phi / p_e$$

$\kappa = 0.1$  : はりの場合

$\kappa = 0.00025t$  : スラブの場合

( $\kappa \leq 0.1$ )

$c = (c_s + c_b) / 2$  , スラブの場合  $c = c_b$

記号

$l_{av}$  : 平均ひび割れ間隔

$s$  : 鉄筋の中心間隔

$b$  : はり幅

$\phi$  : 鉄筋の直径

$a_t$  : 引張鉄筋の断面積

$c_s, c_b$  : 側面および底面でのコンクリートのかぶり厚さ

$A_{ce}$  : コンクリートの有効引張断面積 (鉄筋の重心とその重心が一致する引張側コンクリートの断面積)

$p_e = a_t / A_{ce}$

$t$  : スラブの厚さ

上記のように、平均ひび割れ間隔を求める際、 $\kappa$ を梁とする場合とスラブとする場合で結果が異なる。本研究は主として床スラブを対象としているが、検証の観点から平均ひび割れ間隔をこの二通りの場合により求めた。このとき、 $\kappa$ を梁として求めた平均ひび割れ間隔を PRC 指針梁式の値、スラブとして求めた平均ひび割れ間隔を PRC 指針スラブ式の値としている。

### 4.2 実験結果と PRC 指針による算定結果の比較および考察

#### 4.2.1 破壊に至る経過

荷重の増大にしたがい、曲げひび割れが発生し、その本数が増加するとともに進展した。引張鉄筋の降伏後、コンクリートが圧壊した。最終破壊形式は曲げ破壊である。

試験区間に荷重終了までに発生したひび割れのを  $D=175\text{mm}$  の場合について図 4-1 および図 4-2 に示す。ひび割れは曲げモーメントによって発生したものであり、それぞれの図には、鉄筋降伏前に発生したひび割れ、鉄筋降伏後のものおよび圧縮破壊によるものが示されている。

#### 4.2.2 ひび割れ間隔と全せい

図 4-3 にひび割れ間隔と全せいの関係を示す。実験結果には、定常状態でのひび割れ間隔を

計測した N 面と S 面のそれぞれの各値と N,S 面平均値を示している。また、図には PRC 指針梁式と PRC 指針スラブ式による値も併せて示している。

全せい D が 105mm の試験体を除くと、各値にばらつきはあるものの D が大きくなるにつれてひび割れ間隔は大きくなる傾向がある。N,S 面平均値すなわち、ひび割れ間隔実験値  $l_{av}$  と PRC 指針梁式の値  $b_l l_{av}$  及び PRC 指針スラブ式の値  $s_l l_{av}$  を比較すると、D が 105mm の試験体では、 $l_{av} / b_l l_{av} = 0.94$  と PRC 指針梁式に近い。一方、D が 140, 175, 210mm の試験体では、 $l_{av} / s_l l_{av}$  の値がそれぞれ 1.02, 1.00, 1.05 と PRC 指針スラブ式の値に近い。

#### 4.2.3 ひび割れ間隔と(全せい D)/(有効高さ $D_e$ )

図 4-4 にひび割れ間隔と(全せい D)/(有効高さ  $D_e$ )の関係を示す。ひび割れ間隔と全せいの関係と類似しているが、着目したいのは全せい D と有効高さ  $D_e$  の比  $D/D_e$  である。一般的な床スラブにおける  $D/D_e$  は 2.0~3.0 前後であるため、本研究で用いた試験体のうち D が 140, 175, 210mm のものは、 $D/D_e$  がそれぞれ 2.0, 2.5, 3.0 であり、床スラブとしての適合性が高い。したがって、これらの試験体の平均ひび割れ間隔実験値に PRC 指針スラブ式の値に近いことは、PRC 指針スラブ式の適合性が高いといえることができる。

#### 4.2.4 (ひび割れ間隔)/D と(全せい D)/(有効高さ $D_e$ )

図 4-5 に(ひび割れ間隔)/D と(全せい D)/(有効高さ  $D_e$ )の関係を示す。縦軸はひび割れ間隔をせい D で無次元化した値であるが、 $D/D_e$  が 1.5 では(ひび割れ間隔)/D が約 1.4 であり、実験値は PRC 指針梁式の値に近い。 $D/D_e$  が 2.0 になると(ひび割れ間隔)/D が約 0.8 となり、PRC 指針スラブ式の値とほぼ一致し、 $D/D_e$  が 2.0 以上でも同様の傾向を示している。また、PRC 指針梁式と PRC 指針スラブ式による値は  $D/D_e$  が大きくなるにつれて差が小さくなる傾向が見られる。

#### 4.2.5 PRC 指針ひび割れ幅算定フローにおける $\kappa$ の実験結果と計算値の比較

4.1 に示したように、PRC 指針では平均ひび割れ間隔を算定する際に  $\kappa$  を梁の場合とスラブの場合で異なる値を代入する。この 2通りの値により算定した値と、本実験によって得られたひび割れ間隔から  $\kappa$  を求めた値(以下、 $\text{exp } \kappa$ )に対して比較および考察を行う。図 4-6 に PRC 指針ひび割れ幅算定フローにおける  $\kappa$  と(全せい D)/(有効高さ  $D_e$ )の関係を示す。 $D/D_e$  が 1.5 では  $\text{exp } \kappa$  は 0.087 であり、PRC 指針における梁の場合の  $\kappa = 0.1$  の値と近い。 $D/D_e$  が 2.0, 2.5, 3.0 ではこの値が PRC 指針におけるスラブの場合の  $\kappa$  と近くなっている。したがって、本研究で主な対象とした床スラブの  $D/D_e$  は、実際の設計では約 2.0~3.0 であることから、PRC 指針における  $\kappa$  はスラブの範囲においては適合性が高いと言える。

### 4.3 本実験結果と既往の研究、ならびに PRC 指針による算定結果の比較および考察

#### 4.3.1 既往研究

ひび割れ間隔に着目した最近の研究として、以下のものがある。

寒川・中塚ら<sup>2)</sup>は、中・大型試験体を用いた実験で PRC および RC 梁部材の曲げひび割れ

幅の推定に関する研究を行い、曲げモーメントを受ける試験体に発生するひび割れは2種類あるとした。一つは、曲げひび割れ発生以降、急激にひび割れが進展し、曲げモーメントを受ける試験体断面の引張側に発生する引張破壊に起因するもので、これを M ひび割れとした。もう一つは、M ひび割れ以降に遅れて発生し、あまり進展しないひび割れで、このひび割れを鉄筋とコンクリートの付着によって発生するものとして B ひび割れとした。

古林・中塚ら<sup>3)</sup>は、寒川・中塚ら<sup>2)</sup>と一連の研究における全試験体について、M ひび割れの間隔 $l$ に関して $l/D$  はばらつきがあるものの、平均値は 0.44 で標準偏差は 0.30 であるとした。このとき、大型試験体を用いた既往の研究<sup>4)5)</sup>で示された、ひび割れ間隔平均値 $l_{av}$ が全せい D の 0.5 程度であるという結果と符合するとしている。また、関連する研究として竹内・中塚ら<sup>6)</sup>は、大型 RC 梁の曲げひび割れに関する研究において、古林・中塚ら<sup>3)</sup>の研究で用いた試験体を含め、異形鉄筋を用いた付着の作用している試験体について、全せい D に対するひび割れ間隔 $l$ の比の平均値は 0.438 であるとした。

#### 4.3.2 既往研究の $D/D_e$

古林・中塚ら<sup>3)</sup>および、竹内・中塚ら<sup>6)</sup>は(ひび割れ間隔 $l$ )/D をおよそ 0.44 であるとしたが、それぞれが算定の際に用いた実験試験体について、 $D/D_e$ を調べた結果を図 4-7 ならびに図 4-8 に示す。全せい D はいずれも 300~800mm である。D 及び  $D/D_e$ の平均値については、古林・中塚ら<sup>3)</sup>は 575.0mm, 4.23 であり、竹内・中塚ら<sup>6)</sup>については 555.6mm, 4.08 である。

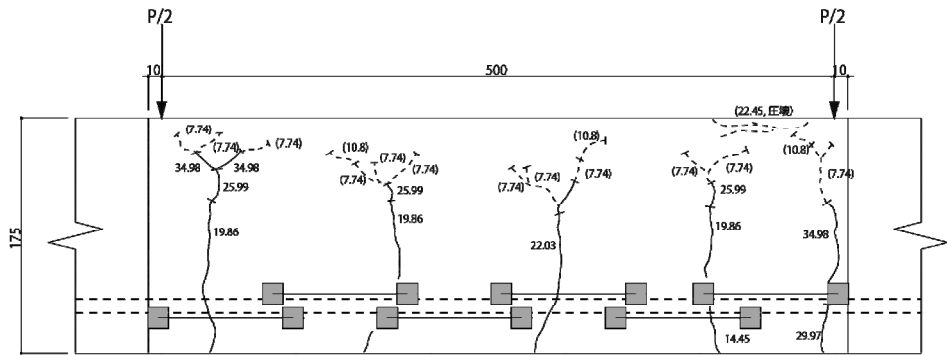
#### 4.3.3 ひび割れ間隔と全せいについての比較および考察

図 4-9 に本研究の実験結果と既往の研究を比較したひび割れ間隔と全せいの関係を示す。本実験で用いた試験体の全せい D は、105~210mm であり、古林・中塚ら<sup>3)</sup>および、竹内・中塚ら<sup>6)</sup>は梁を対象としており、実験に用いた試験体の D は最小のもので 300mm であるため、直接比較することは困難である。しかし、D が小さい範囲すなわち床スラブの設計で用いられる本実験結果の範囲で比較すると、本実験による結果は、(ひび割れ間隔 $l$ )/D を 0.44 とする場合よりひび割れ間隔が大きくなり、適合しないといえることができる。

一方、本実験結果における D=140, 175, 210mm の試験体のデータの回帰直線と PRC 指針梁式および PRC 指針スラブ式、ならびに(ひび割れ間隔 $l$ )/D=0.44 の直線を比較すると、D=360mm 前後で4本の直線が交差し、これらの式によるひび割れ間隔がほぼ等しくなる。D が大きくなるにつれてそれらの差が大きくなり、実験結果の回帰直線と PRC 指針スラブ式は近い値を示すものの、 $l/D=0.44$ の直線と PRC 指針梁式の差は大きくなる。

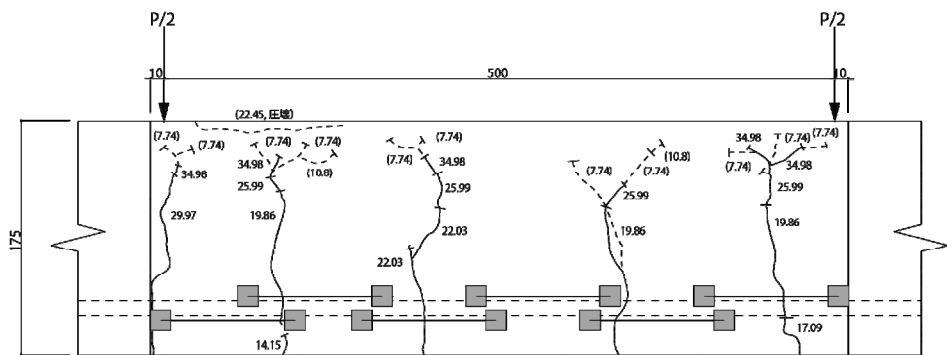
#### 4.3.4 (ひび割れ間隔)/D と(全せい D)/(有効高さ $D_e$ )についての比較および考察

図 4-10 に本研究の実験結果と既往の研究を比較した(ひび割れ間隔 $l$ )/D と(全せい D)/(有効高さ  $D_e$ )の関係を示す。床スラブの設計では通常  $D/D_e$ は 2.0~3.0 程度の値をとるが、この範囲において本実験データのもの(ひび割れ間隔 $l$ )/D=0.44 の直線では差があり、 $D/D_e=2.5$ では差の値が約 0.22、 $D/D_e=3.0$ ではこれが約 0.17 となっている。 $l/D=0.44$ の直線と PRC 指針梁式および PRC 指針スラブ式は  $D/D_e=5.0$  前後でほぼ一致している。



数値 ( )なし: 荷重 P(kN) ( )あり: 鉄筋降伏後および圧壊時の中央たわみ(mm)

図 4-1 N11-175 N 面ひび割れ図



数値 ( )なし: 荷重 P(kN) ( )あり: 鉄筋降伏後および圧壊時の中央たわみ(mm)

図 4-2 N11-175 S 面ひび割れ図

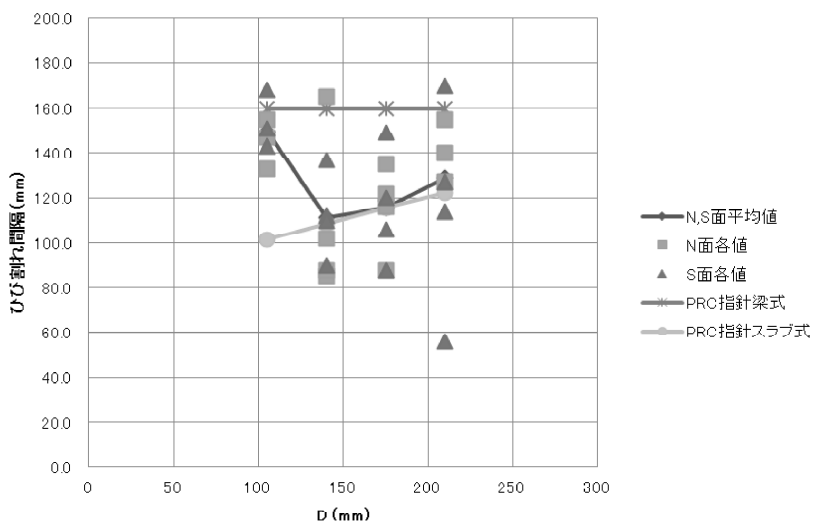


図 4-3 ひび割れ間隔と全せいの関係



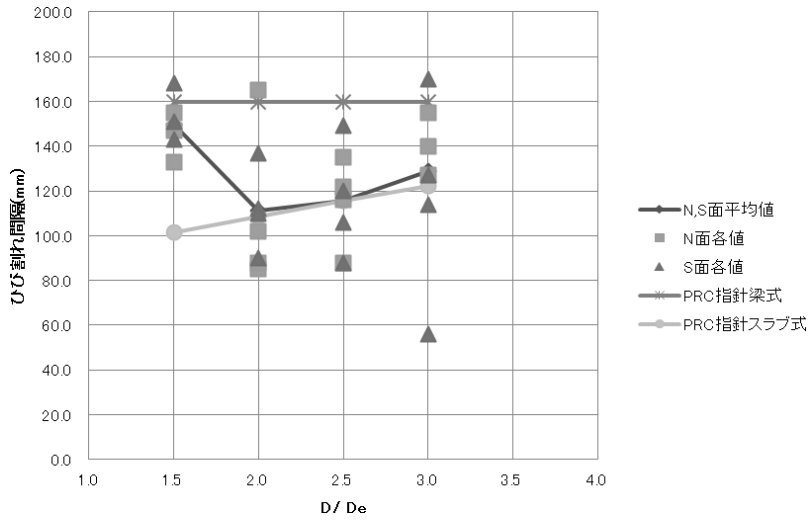


図 4-4 ひび割れ間隔と(全せいD)/(有効高さ $D_e$ )の関係

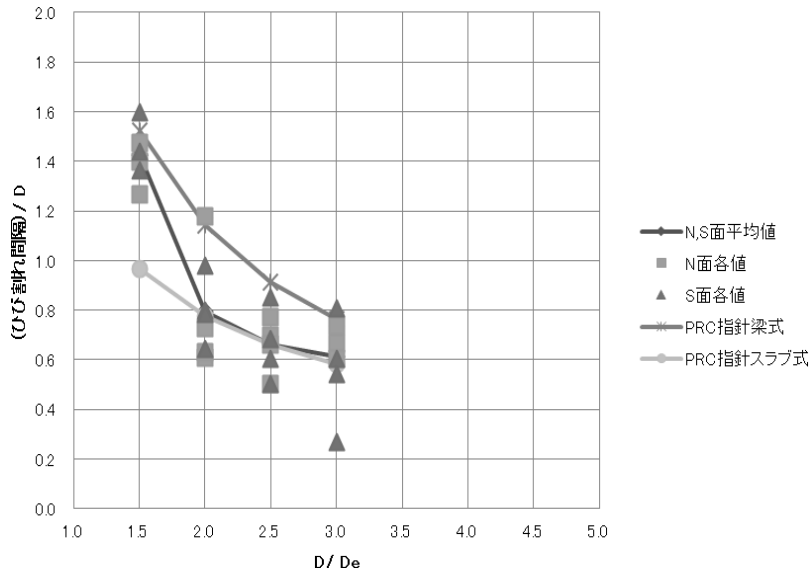


図 4-5 (ひび割れ間隔)/D と(全せいD)/(有効高さ $D_e$ )の関係

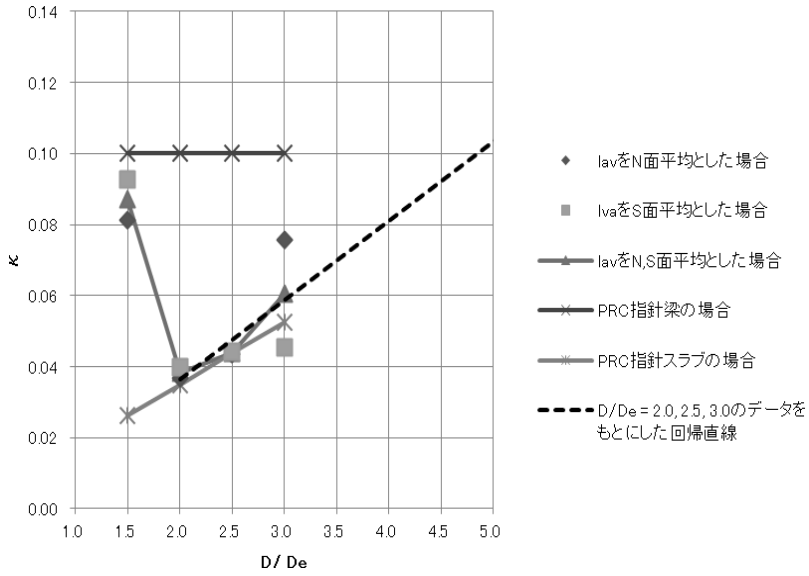


図 4-6 PRC 指針ひび割れ幅算定フローにおける  $\kappa$  と(全せい D)/(有効高さ  $D_e$ ) の関係

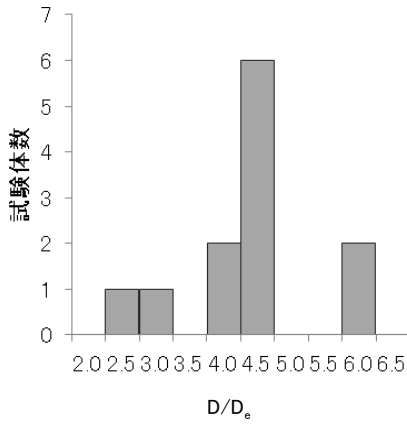


図 4-7 古林・中塚ら<sup>3)</sup>が実験で用いた試験体の(全せい D)/(有効高さ  $D_e$ )に着目した試験体数

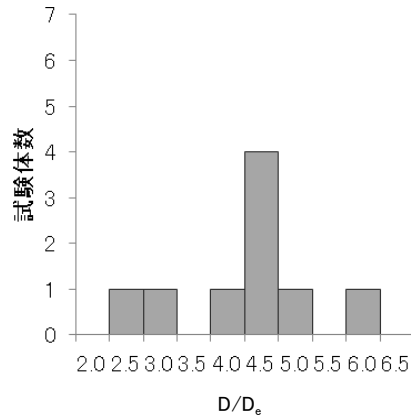


図 4-8 竹内・中塚ら<sup>8)</sup>が実験で用いた試験体の(全せい D)/(有効高さ  $D_e$ )に着目した試験体数

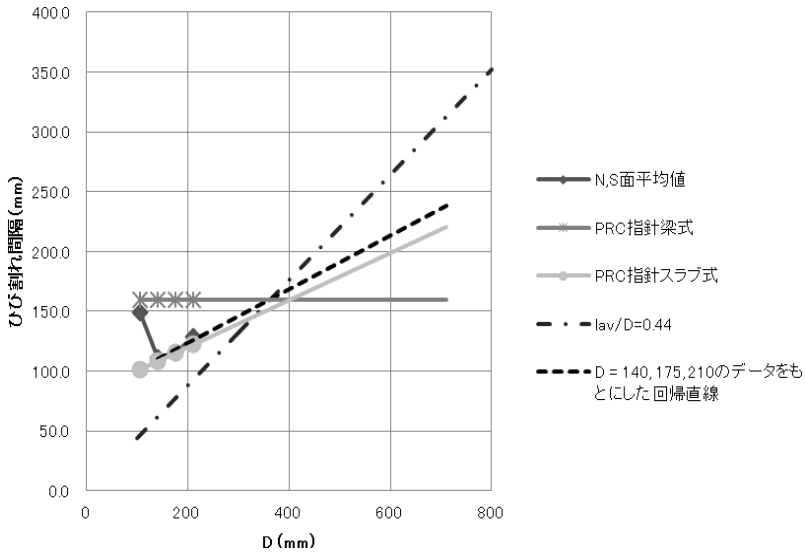


図 4-9 既往の研究と比較したひび割れ間隔と全せいの関係

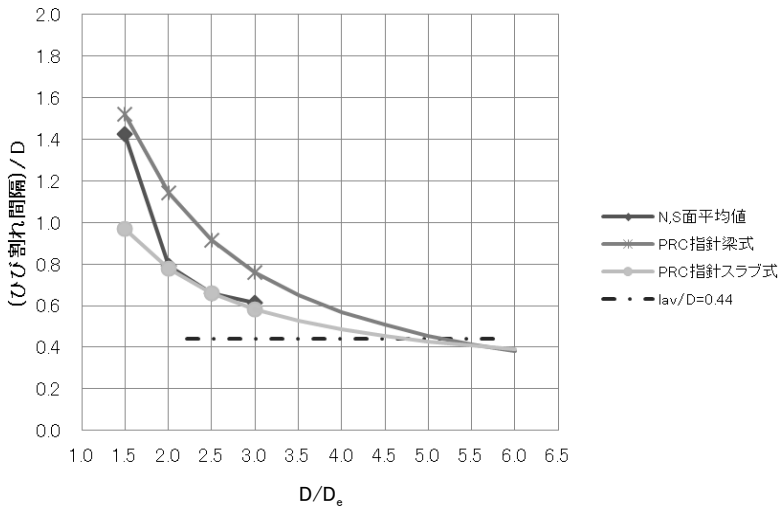


図 4-10 既往の研究と比較した(ひび割れ間隔)/Dと(全せいD)/(有効高さD<sub>0</sub>)の関係

## 5. まとめ

本研究は曲げモーメントを受けるプレストレストコンクリート床スラブについて、ひび割れ幅算定の際に重要となるひび割れ間隔に焦点を当て、有効引張域モデルにおける有効引張域の高さと全せいの関係に着目をして試験体製作および実験、考察を遂行した。明らかになった主な事項は次の通りである。

全せい  $D$  が  $105\text{mm}$  の試験体を除くと、各値にばらつきはあるものの  $D$  が大きくなるにつれてひび割れ間隔は大きくなる傾向がある。

通常の床スラブの値の範囲となっている  $D$  が 140, 175, 210mm の試験体では、ひび割れ間隔実験値は PRC 指針スラブ式の値に近い。

本研究で用いた試験体のうち(全せい  $D$ )/(有効高さ  $D_e$ )が 2.0, 2.5, 3.0 であるものは、ひび割れ間隔は PRC 指針スラブ式による値との適合性が高い。

PRC 指針梁式と PRC 指針スラブ式によるひび割れ間隔計算値は、 $D/D_e$  が大きくなるにつれて差が小さくなる傾向が見られる。

PRC 指針ではひび割れ間隔算定に係数  $\kappa$  を用いる。本実験によって得られたひび割れ間隔から  $\kappa$  を求めた値は、 $D/D_e$  が 2.0, 2.5, 3.0 では PRC 指針におけるスラブの場合の  $\kappa$  と近くなっている。

梁を対象とした古林・中塚ら<sup>3)</sup>および、竹内・中塚ら<sup>6)</sup>は(ひび割れ間隔  $l$ )/ $D$  をおよそ 0.44 としたが、床スラブの設計で用いられる本実験結果の範囲で比較すると、 $l/D$  を 0.44 とする場合より実験結果のひび割れ間隔は大きくなる。

本実験結果における  $D=140, 175, 210\text{mm}$  の試験体のデータの回帰直線と PRC 指針梁式および PRC 指針スラブ式、ならびに  $l/D=0.44$  とする場合のひび割れ間隔を比較すると、 $D=360\text{mm}$  前後においてこれらの式によるひび割れ間隔がほぼ等しくなる。

$l/D=0.44$  とする場合、ならびに PRC 指針梁式および PRC 指針スラブ式による  $l/D$  の値は  $D/D_e=5.0$  前後でほぼ一致している。

#### 【参考文献】

- 1) 日本建築学会：プレストレスト鉄筋コンクリート（Ⅲ種 PC）構造設計・施工指針・同解説、2003 年
- 2) 寒川 勝彦、中塚 信、竹内 寿文、森田 真由美：中・大型梁試験体に基づく PRC および RC 梁部材の曲げひび割れ幅推定に関する再検討（その 2）ひび割れの特性と種類および鉄筋応力-平均伸びひずみ関係、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.853-854、2010 年 9 月
- 3) 古林 桂太、中塚 信、竹内 寿文、森田 真由美：中・大型梁試験体に基づく PRC および RC 梁部材の曲げひび割れ幅推定に関する再検討（その 3）鉄筋応力-ひび割れ幅関係、およびひび割れ間隔、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.855-856、2010 年 9 月
- 4) 吉田 由美子、中塚 信、坂田 博史：中・大型試験体による RC 梁の曲げひび割れ性状に関する再考察、コンクリート工学年次論文集、Vol.31、No.2、pp.241-246、2009 年 7 月
- 5) 井畔 瑞人、塩屋 俊幸、野尻 陽一、秋山 暉：等分布荷重下における大型鉄筋コンクリートはりのせん断強度に関する実験的研究、土木学会論文集、第 348 号、1984 年 8 月
- 6) 竹内 寿文、中塚 信、佐々木 克典、坂田 博史：RC 梁の曲げひび割れ挙動に及ぼす鉄筋比および付着の影響に関する研究（その 4）最大ひび割れ幅の推定、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.871-872、2011 年 8 月