

論文

[2034] 円形補強筋をもつ PC 鋼材定着部の割裂ひびわれ性状ならびにその耐力

正会員 鈴木 計夫 (大阪大学工学部)

正会員 ○中塚 侑 (大阪大学工学部)

菅田 昌宏 (大阪大学工学部)

佐々木 仁志 (清水建設株式会社)

§ 1 まえがき

ポストテンション型プレストレスト(鉄筋)コンクリート構造の設計上の1つのポイントであるPC鋼材定着部の設計をより明確に行うためには、定着部の割裂ひびわれ耐力、同ひびわれ幅ならびに破壊耐力などの諸性状を明らかにする必要がある。無補強ならびに円形補強筋を有する補強定着部の破壊耐力については、実用的に十分な精度をもつ推定式を筆者等は提示[1-3]してきているが、ひびわれ耐力およびそれ以後のひびわれ幅性状に関する研究は未だ十分でない。

本研究は、円形補強筋を有する補強定着部の割裂ひびわれ耐力および同ひびわれ幅性状に及ぼす補強筋特性、支圧板大きさおよびコンクリート強度の影響を明確にして、ひびわれ耐力ならびに荷重-ひびわれ幅関係などの推定式を誘導しようとしたものである。またそれら推定式の適用性についての検討も行っている。

§ 2 実験概要

表1に各実験の概要を示す。実験I-1は、無補強、補強試験体の側表面および内部の割裂引張歪分布を支圧板の一辺大きさ(2a)が異なる場合について調べるものである。実験I-2は試験体側表面における割裂ひびわれ幅が最大となる位置およびひびわれ幅分布に及ぼす2a、補強筋径( $\phi$ )および補強筋巻径(2rs)の影響を検討する実験である。実験I-3は試験体内部のひびわれ幅分布性状を調べるもので、実験要因としては補強筋の有無および2rsを取り上げている。定着部のひびわれ耐力推定式の誘導用のデータを得るための実験IIでは2a、 $\phi$ 、2rs、試験体大きさ(支承面一辺大きさ(2b))およびコンクリート強度( $F_c$ )を広範囲に変化させている。実験III-1は、実

表-1 実験概要

実験名	補強種	2b×H *1	2a	psc(%)	2rs	s	$\phi$	$\sigma_{sy}$	$F_c$	dth	検討項目	測定方法		
I	1	無補強 240×300 補強 ×600	50	—	—	—	—	—	3500	235	—	試験体の側表面 及び内部歪分布	W.S.G(GL=60) H.G (GL=60)	
			~120	0.48	177	25	5.5	3500						
	2	無補強 230×460 補強	70	—	—	—	—	3500	345	345		試験体の側表面 のひびわれ幅分 布性状	クラックゲージ (GL=4b/3≒150)	
			~138	0.27	109	25	4.0							3500
	3	無補強 230×460 補強	150×300 ~250×500	60	0.32	100	25	5.5	3100	205		30	試験体内部の ひびわれ幅分 布性状	クラックゲージ コンタクトゲージ 実体顕微鏡(×50)
				~138	90	~0.84	150	—	—					
II	無補強 150×300 ~300×600 補強	230×460	30	—	—	—	—	—	3100	247, 352, 633	—	ひびわれ耐力 (Pcr)の 定量化	W.S.G (GL=60)	
			~120	50	0.26	100	25	4.0						3100
III	1	無補強 230×460 補強	40	—	—	—	—	—	3100	165	—	荷重-ひびわれ 幅の定量化	クラックゲージ (GL≒150)	
			~138	0.18	100	25	3.2	3100						
	2	無補強 200×400 230×460 300×600 補強	230×460	60	—	—	—	—	3200	234	23	荷重-ひびわれ 幅推定式の 検討	クラックゲージ (GL=4b/3)	
				~150	0.2	180	25	3.0						3200
			~96	~230	—	—	—	~4800	~306	~40				

\*1 実験I-1での試験体のみ2b<sub>z</sub>×2b<sub>y</sub>×H,他の試験体は2b<sub>z</sub>=2b<sub>y</sub>の正方形断面  
 psc:補強筋指標  $\sigma_{sy}$ (kg/cm<sup>2</sup>):補強筋降伏強度 2b(mm):試験体支承面一辺寸法  $\phi$ (mm):補強筋直径  
 2a(mm):支圧板一辺寸法 s(mm):補強筋ピッチ 2rs(mm):補強筋芯々直径 H(mm):試験体の高さ H.G:モールドゲージ  
 $F_c$ (kg/cm<sup>2</sup>):コンクリートシリンダー強度 dth(mm):シース直径 W.S.G:ワイヤーストレインゲージ G.L(mm):検長

験Ⅱと同様の要因を取り上げて荷重(P)－表面ひびわれ幅(w)関係の定量化を目指した実験で、実験Ⅲ-2は誘導されたP－w関係推定式の適合性の検討を行うためのものである。試験体は実験Ⅰ-1の場合を除き、図1に示すように一辺長さが2bの正方形断面と4bの高さを有する角柱体である。補強筋は円形スパイラル筋を載荷面から補強筋巻径と等しい区間に配置されている。またシース孔を有する試験体では、シースを試験体の全長にわたって断面の中央に配置した。載荷は、いずれの実験でも図2に示すように、キャッピングを施さない面を載荷面とし、その面の中央にセットした正方形支圧板を圧縮試験機で加圧することによって行った。実験Ⅰ-3における試験体のひびわれへの樹脂注入は、試験体のひびわれ幅が所定の値になった荷重で持続載荷し、側面ひびわれ幅の増大がほぼ収束傾向を示した段階(載荷後約2日程度)において市販のひびわれ補修法によって行った。実験Ⅰ-1での歪測定にはワイヤーストレインゲージおよび埋込ゲージを用いた。表面ひびわれ幅の測定は試作のキャンチレバー式ひびわれ幅測定器を用いて行い、実験Ⅰ-2では図2に示すように試験体の4側面の $x/b=0, 0.4, 0.8, 1.2, 1.6$ の各位置で、実験Ⅰ-3ならびに実験Ⅲでは実験Ⅰ-2で得たひびわれ幅最大位置の結果を考慮して $x/b=0.8$ の位置でのみ測定した。

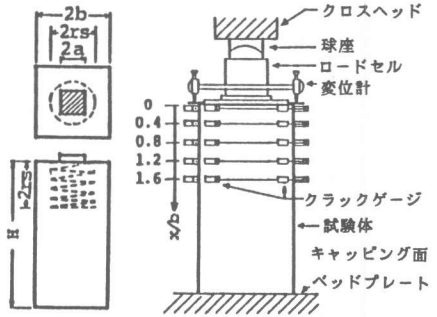


図1 試験体 図2 載荷および測定方法

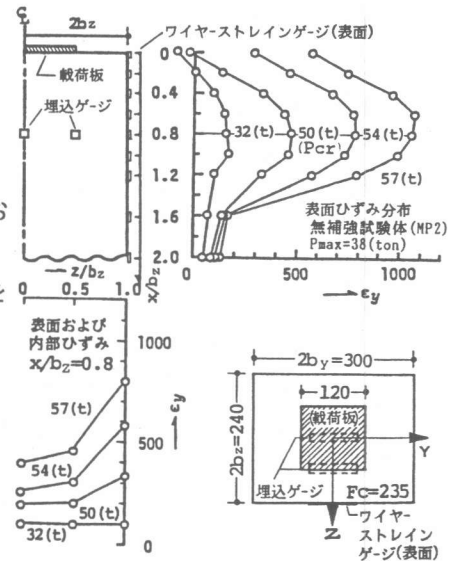


図3 試験体側表面および内部の割裂引張歪分布

### §3 実験結果および考察

#### 3-1 ひびわれ耐力推定式

**割裂引張歪性状とひびわれ耐力の定義：** 図3は、実験Ⅰ-1の無補強試験体の側表面( $z/bz=1$ )における材軸方向(x軸方向)の、および $x=0.8bz$ における試験体内部(z軸方向)の割裂引張歪分布の測定結果の例である。同図によれば、試験体側表面の割裂引張歪は試験体内部( $z/bz=0, 0.5$ )に比べ大きく、この傾向は材軸方向のいずれのx位置でも同様であった。また側表面での割裂引張歪は、後述のひびわれ耐力( $P_{cr}$ )付近の荷重階では、弾性解析による割裂応力分布の結果と同様 $x/bz=0.8$ 辺りで最大となる分布性状を示す、などの傾向が見られる。この傾向は支圧板の大きさならびに補強筋の有無に関わらずほぼ同様であった。したがって本研究ではこの結果から、試験体側表面の $x/bz=0.8$ の位置で測定した割裂引張歪( $\epsilon_y$ )と荷重(P)との関係における、図4に示すような曲線勾配の最大変化点(同図中に示す $\theta$ の最大点)をひびわれ耐力点と定義し、この時の荷重をひびわれ耐力( $P_{cr}$ )とした。

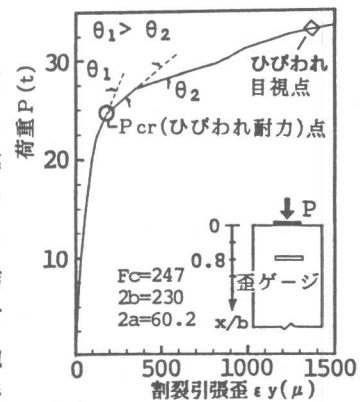


図4 ひびわれ耐力の定義

た割裂引張歪( $\epsilon_y$ )と荷重(P)との関係における、図4に示すような曲線勾配の最大変化点(同図中に示す $\theta$ の最大点)をひびわれ耐力点と定義し、この時の荷重をひびわれ耐力( $P_{cr}$ )とした。

ひびわれ耐力推定式の誘導： 図5は、実験Ⅱにおける無補強試験体の、前述の定義に従って求めたひびわれ耐力( $pP_{cr}$ : 実験値)を同一試験体の破壊耐力( $pP_u$ : 実験値)で除したひびわれ耐力比( $p\alpha_{cr}$ )におよぼすコンクリート強度の影響を示したものである。同図中には種々の2a, 2bのときの、すなわち $Ac/A_1$ (支承面積/支圧面積)が異なる試験体の結果も同時に示している。 $p\alpha_{cr}$ は $Ac/A_1$ の値によって変化するがいずれの $Ac/A_1$ の場合においても、同値におよぼす $F_c$ の影響は殆ど認められない。それ故、実験Ⅱにおけるすべての無補強

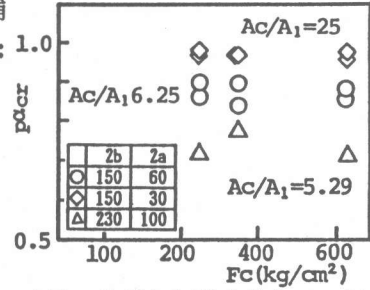


図5 ひびわれ耐力比( $p\alpha_{cr}$ )におよぼす $Ac/A_1$ の影響

試験体の $p\alpha_{cr}$ を $F_c$ の値に関わらず $Ac/A_1$ を横軸にとってまとめると、図6を得た。同図には試験体(支承面一辺(2b))大きさが異なる場合の結果も併記しているが、いずれの試験体大きさの場合においてもひびわれ耐力比 $p\alpha_{cr}$ は支圧板面積比 $Ac/A_1$ の増加にしたがって比例的に上昇し、 $Ac/A_1$ が20以上になるとほぼ1.0の一定値をとる傾向が認められる。それ故、本研究では $p\alpha_{cr}-Ac/A_1$ 関係を(1)式で近似

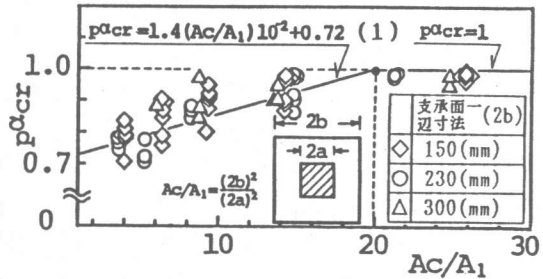


図6  $p\alpha_{cr}-Ac/A_1$ 関係

した。次に図7は、実験Ⅱの補強試験体のひびわれ耐力( $Rp_{cr}$ : 実験値)を対応する無補強試験体の破壊耐力( $pP_u$ : 実験値)で除した比( $R\alpha_{cr}$ )を、 $Ac/A_1$ が14.6と一定である試験体の場合を例として、横軸にひびわれ幅におよぼす補強筋径と巻径の影響を同時に考慮できる補強筋指標 $p_{sc}$

図7 ひびわれ耐力比( $R\alpha_{cr}$ )におよぼす補強筋指標( $p_{sc}$ )の影響

(図7参照)をとって示したものである。同図によれば、

$R\alpha_{cr}$ におよぼす $p_{sc}$ および $F_c$ の明確な影響は認められず、この傾向はいずれの $Ac/A_1$ の場合においてもみられた。それ故、それら要因の影響を考慮せずに、実験Ⅱでの全補強試験体の $R\alpha_{cr}$ の結果を支圧板面積比 $Ac/A_1$ を横軸にとって整理したものが図8である。同図には無補強試験体の $p\alpha_{cr}$ 推定式(1)式を併記するが、補強試験体のひびわれ耐力比 $R\alpha_{cr}$ は(1)

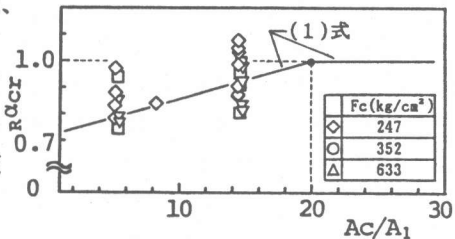


図8  $R\alpha_{cr}-Ac/A_1$ 関係

式によってほぼ推定できると思われる。 $\alpha_{cr}=1.4(Ac/A_1)\times 10^{-2}+.72$  ( $Ac/A_1 < 20$ )  
 $\alpha_{cr}=1$  ( $Ac/A_1 \geq 20$ ) (1)式

この結果に従えば、定着部のひびわれ耐力( $P_{cr}$ )は、無補強定着部の破壊耐力( $pP_u$ )とひびわれ耐力比( $\alpha_{cr}$ )を用いて(2)式のように与えられる。

$$P_{cr} = \alpha_{cr} \cdot pP_u \quad \dots (2)式$$

$$\left( \begin{array}{l} pP_u = \alpha_1 \alpha_2 (Ac/A_1)^{0.52} \cdot F_c \cdot A_1 \\ \alpha_1 = 1.2 - 5.1 \times 10^{-4} F_c, \alpha_2 = .78 / (2b/15 + .62) + .52 \end{array} \right)$$

### 3-2 荷重-ひびわれ幅関係式

ひびわれ幅性状：試験体の側表面でのひびわれの発生本数は、本研究で対象としている試験

体の最大耐力以前でのひびわれ幅が0.1~0.4mm程度の荷重階では、支圧板大きさ、補強筋の有無および補強筋特性などの各種要因に関わらず、いずれの試験体でも1側面あたり1本観察された。図9は、実験I-2の各補強試験体において、最も進展の著しかったひびわれが観察された側面における表面ひびわれ幅分布の例を示したものである。

同図の(a),(b),(c)で示す試験体はタイプI(支圧板直下の補強部分のコンクリートが破壊するもの)の、また(d)の試験体はタイプII(補強された部分の直下の無筋コンクリート部分が破壊するもの)の破壊を起こした試験体である。同図によれば、表面ひびわれ幅は、支圧板大きさ、補強筋の直径と巻き径ならびに破壊タイプなどの諸要因に関わらず、ほぼ $x=0.8b$ の位置で最大ひびわれ幅を示すと考えられる。

次に図10は、実験I-3の試験体において測定した、 $x=0, 0.4b, 0.8b$ および $1.2b$ の位置における試験体内部のひびわれ幅の分布例である。同図に例示されるように、ひびわれ幅はいずれの $x$ 位置においても内部に向かうほど減少する傾向を示し、この傾向は支圧板大きさ、支承面大きさ、および補強筋特性に関わらず観察された。それ故、本研究ではPC鋼材定着部の最大ひびわれ幅は $x=0.8b$ 位置の側表面で生じると考え、次項以下の考察を行う。なお、図10例でも示されるように除荷後の側表面ひびわれ幅は $x=0.4b$ 位置の方が大きくなっている。しかし前述したように、ひびわれへ注入した樹脂が硬化するまでの持続荷重を除荷する以前においては、殆どの試験体において $x=0.8b$ 位置で側表面ひびわれ幅が最大値を示しており、この逆転は、持続荷重の除荷によるひびわれ幅の減少が、いずれの試験体の場合でも、 $x=0.8b$ の方が $x=0.4b$ でのそれよりも大となったことに起因している。

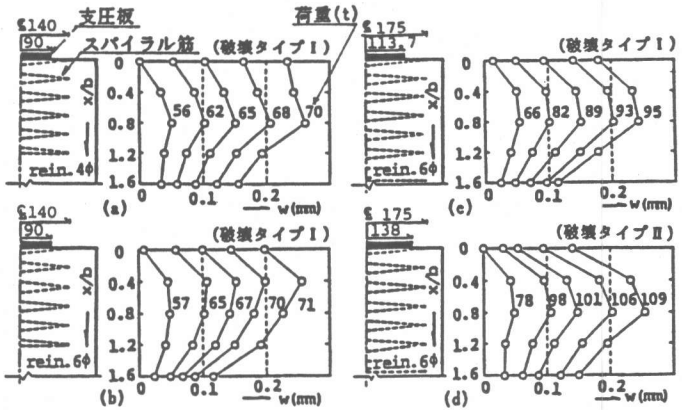


図9 試験体側表面のひびわれ幅分布

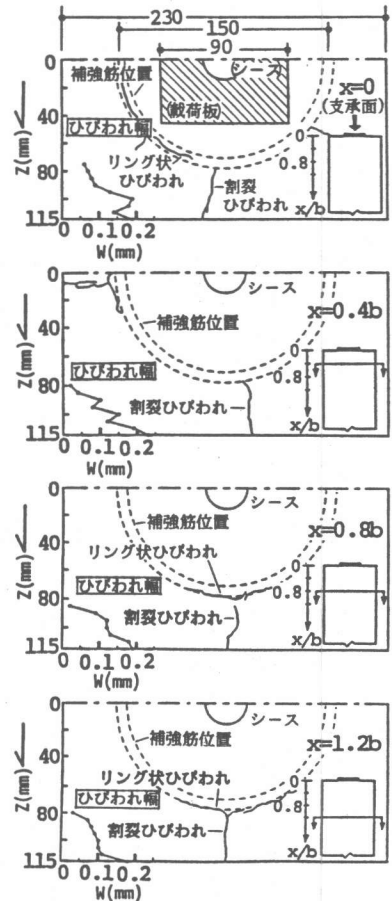


図10 試験体内部のひびわれ性状

荷重-ひびわれ幅関係： 図11は、実験Ⅲ-1の試験体のひびわれ耐力( $P_{cr}$ )以降の荷重-ひびわれ幅( $w$ )関係を、 $P_{cr}$ から $P_u$ までの耐力上昇量に対する $P_{cr}$ からひびわれ幅が $w$ となる荷重( $=P_w$ )までの耐力上昇量の比 $k_w$  (上昇耐力比:  $k_w = (P_w - P_{cr}) / (P_u - P_{cr})$ ) と  $w/2b$  (mm)との関係として示したものである。同図によれば、ばらつきはあるものの、 $k_w - w/2b$ 関係は支圧板大きさ、補強筋特性ならびにコンクリート強度などに関わらず、( $w/2b$ )の増大に対して $k_w$ の増加率が減少するほぼ同様の曲線となる。それ故、本研究では $k_w - w/2b$ 関係を(3)式で示すような双曲線式で近似し、また、同式中の3種の係数 $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ は、コンクリート構造のひびわれ幅を取り扱う際にしばしば用いられるひびわれ幅が0.1mmおよび0.2mm時での $k_{0.1}$ 、 $k_{0.2}$ および、ひびわれ耐力時での表面ひびわれ幅 $w_0$ から決めることとした。

$$k_w = \frac{-C_1}{w/2b + C_2} + C_3 \quad (3)式$$

$$C_1 = 3.5 \times 10^{-4} \quad C_2 = 1.81 \times 10^{-4} \quad C_3 = 1.13$$

まず図12(a)は $k_{0.1}$ 、 $k_{0.2}$ に及ぼす横補強筋指標 $p_{sc}$ の影響を調べるため支圧板大きさ、コンクリート強度が同一で $p_{sc}$ のみが変化する試験体の $k_{0.1}$ 、 $k_{0.2}$ を例示したものである。同図によれば、それら $k$ 値は $p_{sc}$ に関わりなくほぼ一定値を示し、この傾向はいずれの支圧板大きさ(2a)およびコンクリート強度( $F_c$ )の場合でも同様であった。それ故次に、 $F_c$ および2aが同一で $p_{sc}$ のみが異なる試験体の $k_{0.1}$ 、 $k_{0.2}$ をそれぞれ平均し、それら各平均 $k$ 値に及ぼす $F_c$ の影響を2aが同一である試験体について調べた例が図12(b)である。2aが本例のものと同様の場合も同様の傾向を示したが、同図より、 $k_{0.1}$ 、 $k_{0.2}$ に及ぼす $F_c$ の明確な影響は認められない。従って、支圧板大きさ2aが同一でコンクリート強度 $F_c$ が異なる図12(c)で示されるような $k_{0.1}$ 、 $k_{0.2}$ のデータを平均し、その結果から2a ( $A_c/A_1$ )の影響を調べた。図12(c)は得られた各 $k$ 値の平均値を、横軸に $A_c/A_1$ をとって示したものであるが、同図によれば、ばらつきは大きいものの $A_c/A_1$ が $k_{0.1}$ 、 $k_{0.2}$ に及ぼす明確な影響は認められない。以

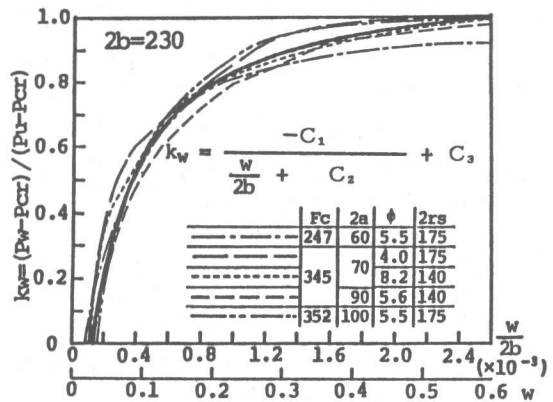
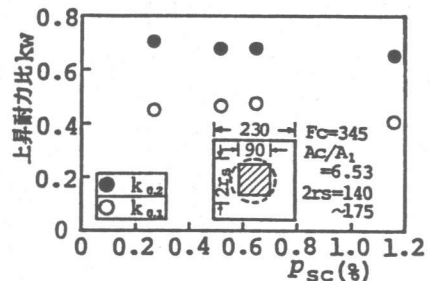
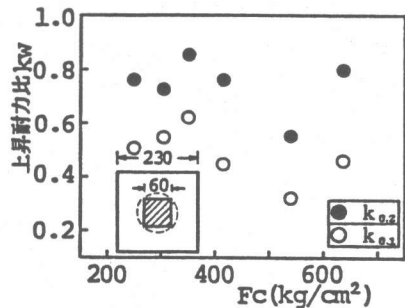


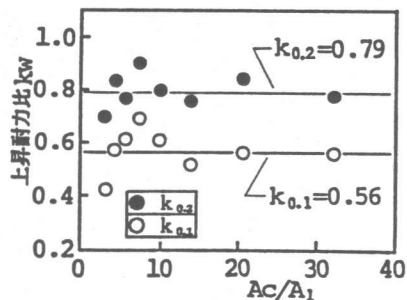
図11 上昇耐力比( $k_w$ )-(ひびわれ幅)/(支圧面一辺大きさ)( $w/2b$ )関係



(a) 補強筋指標 $p_{sc}$ の影響



(b) コンクリート強度 $F_c$ の影響



(c) 支圧面積比 $A_c/A_1$ の影響

図12  $k_{0.1}$ 、 $k_{0.2}$ におよぼす諸要因の影響

上のことは、上昇耐力比  $k_{0.1}$ ,  $k_{0.2}$  が  $p_{sc}$ ,  $F_c$  および  $A_c/A_1$  の影響を受けないことを示しており、このことは、図11の  $k_w - w/2b$  関係がそれら要因にかかわらずほぼ同様の曲線となったことと符合している。それ故、本研究では  $k_w - w/2b$  関係は横補強筋指標、支圧板大きさおよびコンクリート強度等の諸要因にかかわらず(3)式

による同一の曲線で表わされるものとした。また同曲線を決定する係数  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  の値としては、上記の考察に用いた実験Ⅲ-1のすべての試験体から求めた、 $k_{0.1}$ ,  $k_{0.2}$  の平均値(それぞれ0.56, 0.79) および  $w_0$  の最頻値(0.03) を用いることによって、 $C_1 = 3.5 \times 10^{-4}$ ,  $C_2 = 1.81 \times 10^{-2}$  および  $C_3 = 1.13$  を得た。

### 3-3 荷重-ひびわれ幅関係推定式の適合性

図13は、支承面一辺大きさ  $2b$  が異なる場合における(3)式の適用性を検討するため、実験Ⅲ-2の  $2b=300\text{mm}$  である試験

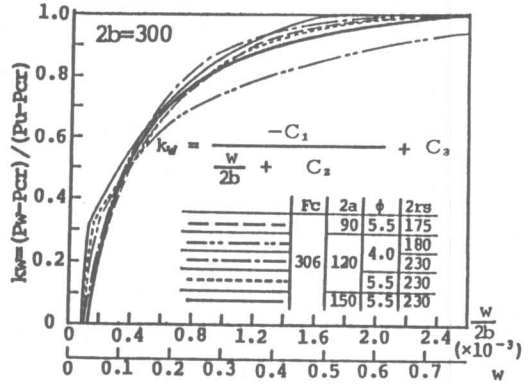


図13 実験Ⅲ-2の  $k_w - w/2b$  関係による推定式(3)の検討

体の代表的な  $k_w - w/2b$  関係を例示したものである。同図によれば、(3)式による曲線は各試験体の  $k_w - w/2b$  関係をほぼ良好に近似し、 $2b$  が異なる場合でも同式によって  $k_w - w/2b$  関係が推定され得ると考えられる。次に図14は実験Ⅲ-2の各試験体のひび

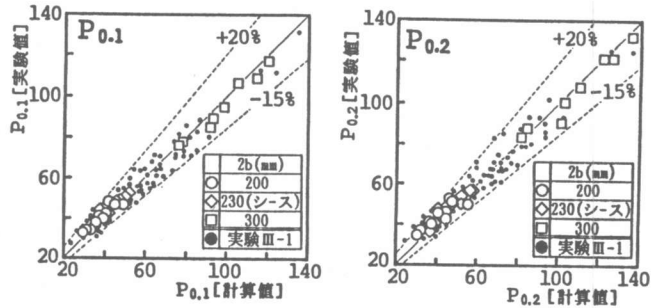


図14 実験Ⅲ-2の  $P_{0.1}$ ,  $P_{0.2}$  に対する推定式の適合性

時の荷重  $P_{0.1}$  および  $P_{0.2}$  の実験値と(3)式から求まるそれらの推定値を比較したものである。実験値は、同図中に●で示した本推定式の誘導に用いた実験Ⅲ-1の結果についての場合と同様、推定値に対し-15%~+20%の精度で推定される。以上のことから本推定式は定着部の荷重-ひびわれ幅関係を実用上十分な精度で推定できると考えられる。

## 4 まとめ

1. 定着部のひびわれ耐力 ( $P_{cr}$ ) は補強筋の有無にかかわらず(1)式および(2)式を用いてほぼ推定できる。(図5~8参照)
2. 割裂ひびわれ幅は、定着部側表面では  $x = 0.8b$  位置付近で最大となるような、また内部に向かうに従って減少する分布性状を示す。(図9,10参照)
3. 定着部の荷重-ひびわれ幅 ( $P - w$ ) 関係に及ぼす諸要因の影響を調べ、同関係の推定式として(3)式を誘導した。また、同式が実用的に十分な精度を有することを明らかにした。(図11~14参照)

### 【参考文献】

1. 鈴木, 中塚: 円形補強筋をもつPC鋼材定着部の強度および破壊機構に関する研究; 日本建築学会論文報告集 第315号, 1982.5, 第341号, 1984.7
2. 鈴木, 中塚, 増田: 円形補強筋を有するPC鋼材定着部の破壊強度に関する研究; コンクリート工学年次講演会論文集 1984
3. 鈴木, 中塚, 佐々木, 酒井: PC鋼材定着部の割裂ひびわれ性状に関する研究; 日本建築学会近畿支部研究報告集 1986
4. 鈴木, 中塚, 佐々木, 菅田: 円形補強筋をもつPC鋼材定着部の割裂ひびわれ耐力性状; 日本建築学会近畿支部研究報告集 1987