

論文 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

吉田 由美子*1・中塚 侑*2・坂田 博史*3

要旨：プレストレスト鉄筋コンクリート(PCR)構造における設計のキーポイントは、ひび割れ制御設計であるが、設計指針における規定は、主として小型試験体の実験データに基づいているため、スケールの効果に対する考慮が不十分と考えられる。本研究では中・大型の鉄筋コンクリート梁の曲げ試験を行い、新測定方法によってひび割れ幅算定に必要な基礎データを得た。その結果から、曲げひび割れの種類、テンションスティフニング効果、平均ひび割れ間隔などにおよぼす梁せいの影響を調べ、現行の曲げひび割れ幅算定法におけるバックデータについて再考察した。

キーワード：鉄筋コンクリート梁部材、テンションスティフニング効果、ひび割れ間隔、ひび割れ幅

1. はじめに

鉄筋コンクリート(以下 RC と略記)およびプレストレスト鉄筋コンクリート(Ⅲ種 PC, 以下 PRC と略記)構造では、ひび割れ制御設計が重要なキーポイントである。しかし、現行の日本建築学会プレストレスト鉄筋コンクリート構造設計施工指針・同解説(以下 PRC 指針と略記)では、曲げひび割れ幅の算定に必要なひび割れ間隔とひび割れ区間の平均伸びひびきみなどのデータを、主に鉄筋を中央に埋め込んだプリズム型試験体の単軸引張試験、ならびに梁せいが 300 mm 程度以下の小型梁試験体の実験結果に基づいている

ため、スケールに対する考慮が十分でないと考えられる。

本研究では、中・大型鉄筋コンクリート梁の曲げ試験を行い、曲げひび割れ性状、テンションスティフニング効果などにおよぼす梁せいの影響を明らかにして、ひび割れ制御設計に資することを目的とする。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

試験体の概要を表-1に示す。試験体は、小型、中型および大型の3体(梁せい D : 200,600,800mm)とした。

表-1 試験体一覧

試験体名			D200	D600	D800
梁幅 梁成	b (mm)		280	280	455
	D (mm)		200	600	800
コンクリート引張最外縁から 主筋までの距離		dt (mm)	68	68	68
有効成	d (mm)		132	532	732
	j (mm)*1		116	466	641
コンクリートのかぶり厚さ (試験区間)	c _b (mm)		60	60	60
	c _s (mm)		54	54	54
試験間距離		3D (mm)	600	1800	2400
支点間距離		L (mm)	1800	5400	7200
コンクリート	計画強度	F _C (N/mm ²)	30	30	30
主筋	径 (断面積)	mm ²	D25 (507)	D25 (507)	D25 (507)
	品質 (実降伏強度)	σ _{cy} (N/mm ²)	SD345 (362)	SD345 (362)	SD345 (362)
	断面積	at (mm ²)	1521 (3-D25)	1521 (3-D25)	2535 (5-D25)
	引張鉄筋比	pt (%)	4.12	1.02	0.76
	有効鉄筋比	pe (%)	3.99	3.99	4.10
	せん断 補強筋	径 (断面積)	mm ²	D13 (127)	D13 (127)
品質			SD295A	SD295A	SD295A
断面積		a _w (mm ²)	254 (D13 @100)	254 (D13 @150)	254 (D13 @200)
降伏強度		σ _{wy} (N/mm ²)	295	295	295

*1 : 0.875d

*1 西日本高速道路(株) 保全サービス事業本部 保全サービス事業部 (正会員)

*2 大阪工業大学 工学部 空間デザイン学科 教授 工博 (正会員)

*3 (株)建研 大阪支店設計部 (正会員)

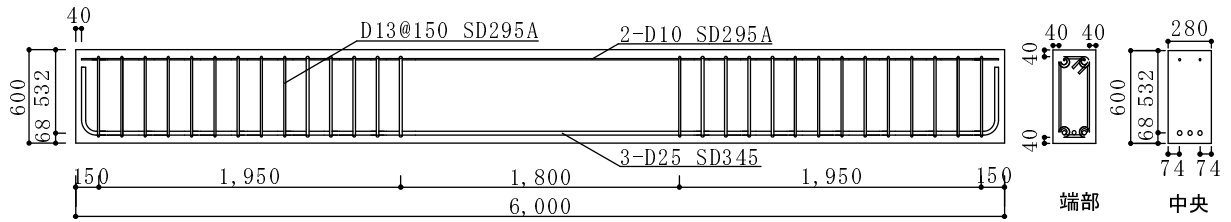


図-1 断面図 (D600)

表-2(a) 使用コンクリートの力学性状

試験体名	圧縮強度	引張強度	曲げ強度	弾性係数(×10 ⁴)
D200	44.0	3.5	-	3.2
D600	47.8	3.3	10.2	3.3
D800	44.5	3.1	-	3.4

単位 (N/mm²)

表-2(b) 使用鉄筋の力学性状

D25	降伏応力度	362.1
	弾性係数(×10 ⁵)	1.96

単位 (N/mm²)

表-2(c) コンクリートの調合表

設計基準強度 N/mm ²	粗骨材の最大寸法 MG mm	スランプ SI cm	水セメント比 W/C %	空気量 Air %	細骨材率 S/a %	単位量				
						水 W kg	セメント C kg	細骨材 S %	粗骨材 G %	減水剤 kg
30	20	8.0±2.5	45	2.0±1.5	43.0	156	347	792	1091	1.53

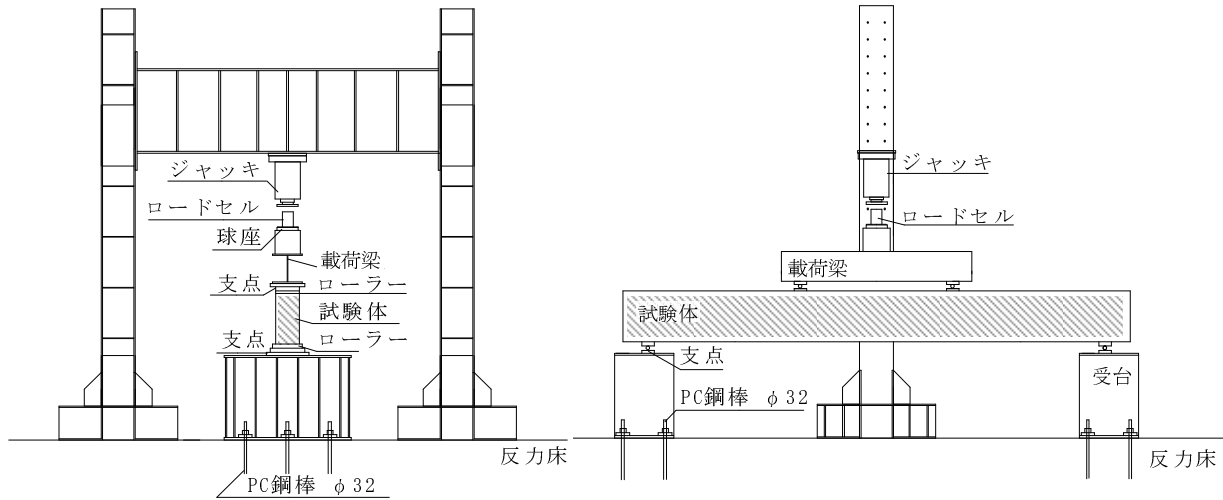


図-3 載荷図

また、全ての試験体では、有効鉄筋比、主筋の径および間隔ならびにコンクリートのかぶり厚さは共通とし、PRC 指針によって算出される梁のひび割れ間隔が、全ての試験体において等しくなるように計画した。なお、ひび割れ性状に及ぼす影響を除くため、試験区間には横補強筋は配筋せず、また引張主筋にはひずみゲージを添付していない。試験体配筋図の例を図-1に示す。

2.2 使用材料

コンクリートおよび鉄筋の力学性質を表-2(a)および(b)に示す。また、コンクリートの調合表を表-2(c)に示す。

2.3 載荷方法および測定項目

梁の載荷は、図-3に示すような等曲げ区間を3Dとする2点載荷とした。また、測定は以下の項目について行った。①鉄筋位置での伸び(インバーより線による伸び計)②圧縮側のコンクリートひずみ(同縮み計)、③ひび割れ間隔、④ひび割れ幅、ならびに⑤梁中央および試験区間端部のたわみ変位

ここで、鉄筋位置での伸びひずみ、および圧縮縁より68mm 梁中央側の位置における圧縮側コンクリートひずみは、コンタクトゲージ、パイゲージや主筋にひずみゲージを貼付する従来の離散的な測定方法ではなく、測定区間全域の変形量をまとめて測定できる方法で行った。すなわち、図-4に示す様に、試験区間でコンクリート表面にほぼ等間隔に貼付した鉄片に接合した滑車に、一端を固定し他端に錘を取りつけたインバーより線を巻きつけ、錘に生じる上下変位を高感度ひずみ変位計で測定し、同変位を試験区間長で除する方法で行った。

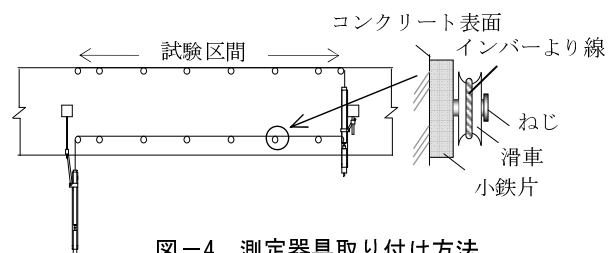


図-4 測定器具取り付け方法

曲げひび割れ幅は、精度 $0.01 \mu\text{m}$ の高性能マイクروسコープを用い、梁中央部の試験区間内に発生した個々のひび割れに対し、引張鉄筋位置から上下 40mm の位置でひび割れ幅を測定し、鉄筋位置ひび割れ幅はその平均値とした。

3. 実験結果および考察

3.1 曲げひび割れ位置鉄筋応力－鉄筋位置平均伸びひずみ関係

図-5 に曲げひび割れ位置鉄筋応力 (σ_t)－鉄筋位置平均伸びひずみ関係 (ε_{tav}) 関係を示す。なお、 σ_t は実務設計を考慮し、引張コンクリートを無視した梁断面の弾性曲げ解析による値とする。また、同図中には鉄筋単体の応力 (σ_t)－ひずみ (ε_{t0}) 関係も併記した。なお、D200 試験体は引張鉄筋比が非常に大きいため、 σ_t が 250N/mm^2 以上の荷重増になると圧縮部に圧壊が生じたため、 $\sigma_t < 250\text{N/mm}^2$ 部分のみを表記している。

図-5 によれば、いずれの試験体の $\sigma_t - \varepsilon_{tav}$ 関係も鉄筋単体の応力－ひずみ ($\sigma_t - \varepsilon_{t0}$) 関係に漸近する傾向を示すが、後述するコンクリート拘束ひずみ (ε_{cm}) は、小型の D200 試験体の $\sigma_t - \varepsilon_{tav}$ 関係では値は小さく、初期範囲から $\sigma_t - \varepsilon_{t0}$ 関係にほぼ平行となった。これに対し、D600, D800 試験体では、勾配の大きい初期範囲から $\sigma_t - \varepsilon_{t0}$ 関係に急に漸近し、 ε_{cm} は D200 のそれよりも大きい値を示した。なお、 $\sigma_t - \varepsilon_{tav}$ 関係は鉄筋の降伏応力よりも大きな応力を示しているが、これは σ_t が引張コンクリート応力無視の弾性解析値であることに起因していると考えられる。

3.2 鉄筋応力－コンクリート拘束ひずみ関係

図-6 は各試験体で、ひび割れ位置鉄筋応力 (σ_t) が同じときにおける鉄筋単体ひずみ (ε_{t0}) と平均伸びひずみ (ε_{tav}) の差であるコンクリート拘束ひずみ (ε_{cm}) が σ_t の変化によってどのように推移するかを示したものである。

同図中にはコンクリート引張強度を平均値 3.3N/mm^2 として算出した PRC 指針式による $\sigma_t - \varepsilon_{tav}$ 関係、および角田らによるデータ⁴⁾ (梁 $D=300\text{mm}, pe=3.0\%$) も併記し

ている。図-6 から次のことが分かる。①D800, D600 試験体では、 ε_{cm} は σ_t の増大に対し減少し一定値に収束する傾向がある。②梁せいの小さい D200 試験体および角田等データの収束値は、現行の PRC 指針式と同程度の値で、D600・D800 試験体に比べて小さい値を示した。これは図-7 に、引張縁コンクリート応力が共通な場合について模式的に示したように、梁せいの大きい試験体に比べ、梁せいの小さい試験体では、主筋に対する引張コンクリートの寄与度が小さくなることに起因する現象と考えられる。

次に図-8 は、各試験体のコンクリート拘束ひずみ ε_{cm} から PRC 指針式に従って換算した $k_1 k_2 - \sigma_t$ 関係を示す。同図中に示す指針式が双曲線であるのに対し、梁せいが小さい D200 試験体および角田等のデータは、 σ_t が $200 \sim 300\text{N/mm}^2$ の範囲では値そのものは指針式と同

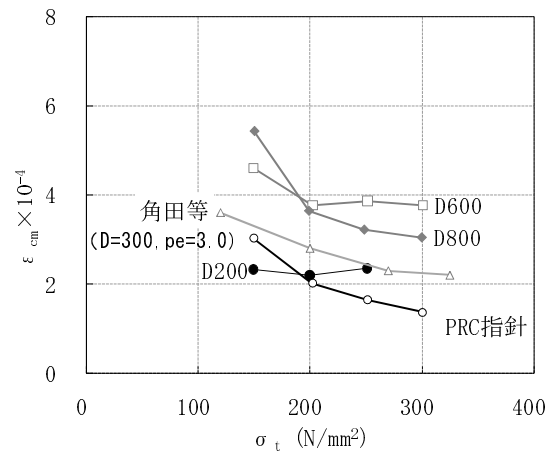


図-6 $\sigma_t - \varepsilon_{cm}$ 関係

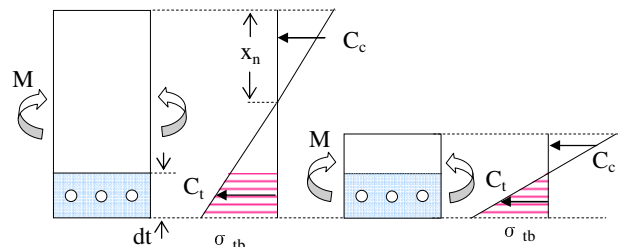


図-7 梁せいの影響 (模式図)

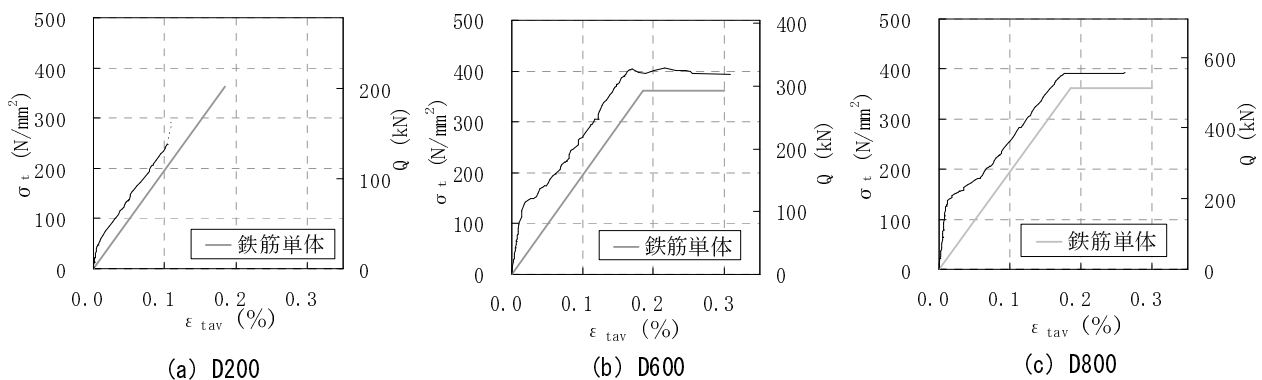


図-5 $\sigma_t - \varepsilon_{tav}$ 関係

程度のほぼ一定値を示す。さらに、D600、D800 試験体も値は大きいがほぼ一定の k_1k_2 値を示した。因みに図-9は、横軸に $(D-x_n)/2dt$ (x_n : 中立軸深さ、 dt : 断面引張縁から主筋重心位置までの距離) をとって、縦軸に以上の k_1k_2 値を示したものであるが、同図によれば、ひび割れ深さ $(D-x_n)$ が $2dt$ の3倍以上になると、 k_1k_2 はほぼ一定になる傾向がみられた。

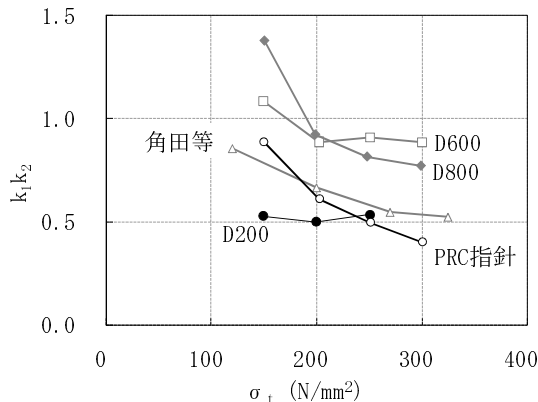


図-8 $\sigma_t - k_1k_2$ 関係

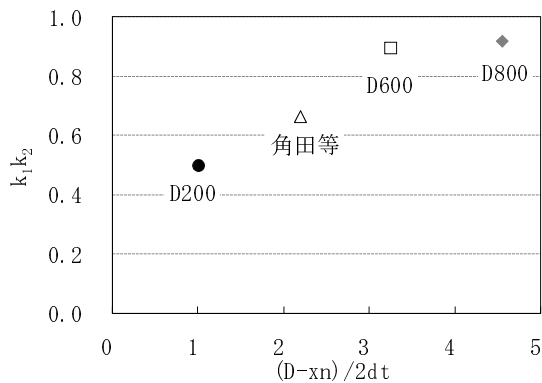


図-9 $k_1k_2 - (D-x_n)/2dt$ 関係

3.3 ひび割れ性状と採用ひび割れの定義

図-10は、図-11で示す各試験体における個々のひび割れの σ_t の増加に伴うひび割れ幅 (w) の進展状況を、D600 試験体を例にとって示したものである。同図によれば、ひび割れには σ_t の増大とともに幅を増大させるものと、 σ_t によって余り変化しないのがみられた。それ故本研究では、 $\sigma_t = 200\text{N/mm}^2$ においてひび割れ幅が 0.05mm 以上³⁾かつ σ_t の増大に伴ってひび割れ幅が進展するものを、平均ひび割れ間隔・平均ひび割れ幅・ひび割れ本数などの算定に採用するひび割れとした。さらに、採用ひび割れには、次の2種類が観察された。まず、ひび割れ長さが σ_t の増大とともに中立軸を目指して大きく進展するひび割れである。このひび割れの進展要因は、曲げモーメントによるものと考えられ、このひび割れを曲げひび割れと呼ぶ。これに対し、ひび割れ長さが引張コンクリート最外縁から梁せい方向に $2dt$ 付近にまでしか進展しないひび割れが観察された。これは鉄筋とコン

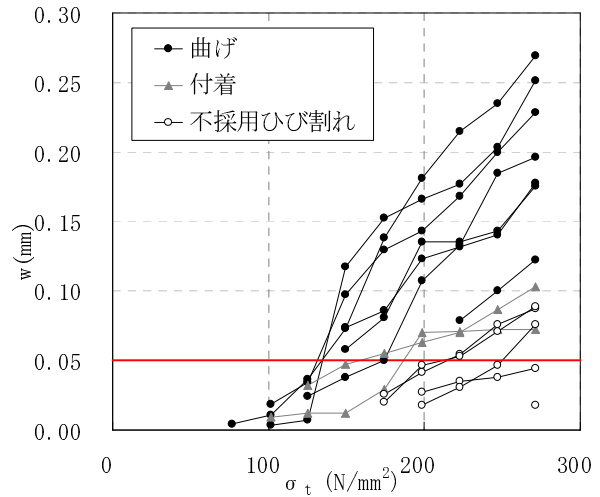
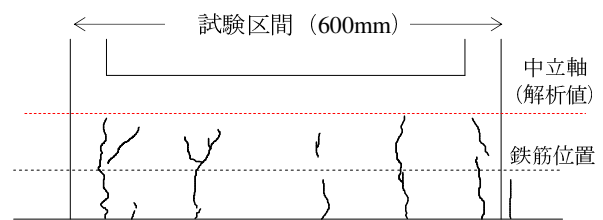
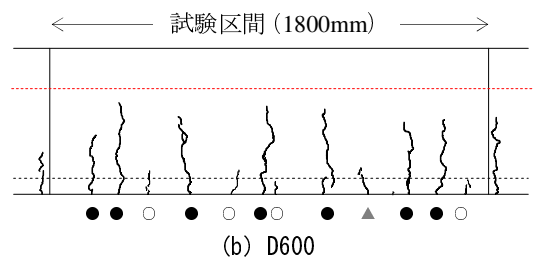


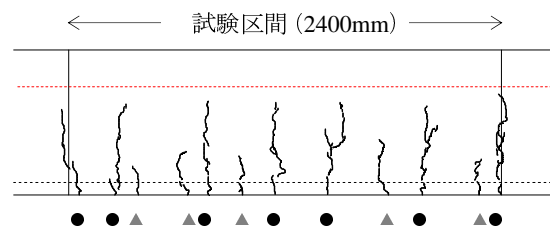
図-10 $\sigma_t - w$ 関係 (D600 試験体)



(a) D200



(b) D600



(c) D800

図-11 ひび割れ図 ($\sigma_t = 200\text{N/mm}^2$)

クリートの付着によるひび割れと考えられ、本論ではこのひび割れを付着ひび割れと呼ぶ。

$\sigma_t = 200\text{N/mm}^2$ 時における各試験体の、前述した方針に従って分類したひび割れ図を図-11に示す。採用しなかったひび割れを細線で、採用したひび割れを太線で示す。また、試験体図の下部に不採用ひび割れを白丸印、曲げひび割れを黒丸印、付着ひび割れを三角印で示す。ここで、梁せいの小さいD200の試験体は、中立軸と $2dt$ が近接しているため曲げひび割れと付着ひび割れの区別が明確に出来ないため印はつけていない。

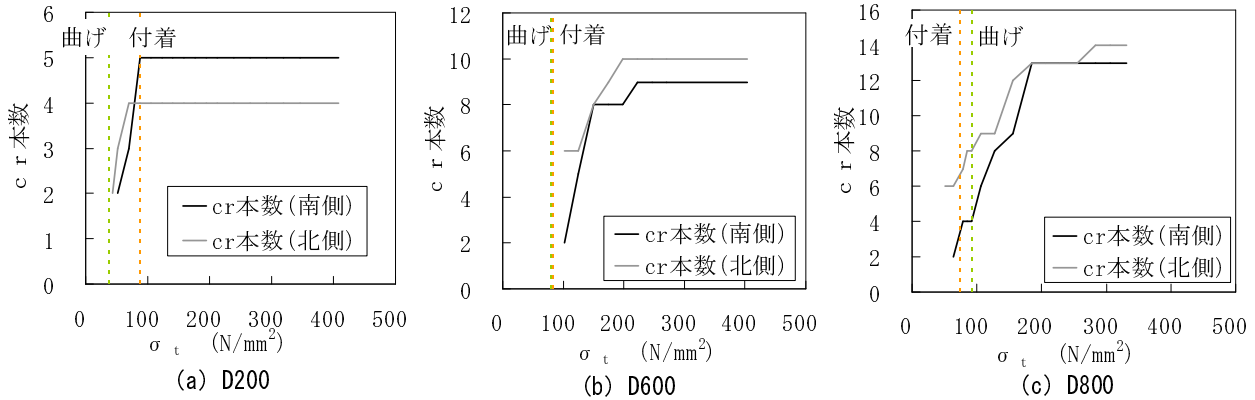


図-12 σ_t -cr 本数関係

3.4 ひび割れ本数

ひび割れの発生の原因として、曲げモーメントによる引張下縁応力および鉄筋の付着応力によってコンクリートに伝達される引張応力が考えられる。図-12 は実験において、 σ_t の増大に対しひび割れ本数がどの様に増加したかを示したものである。同図には、コンクリートの引張強度を用いた曲げひび割れモーメントを超えてひび割れが発生した直後の σ_t 計算値、および鉄筋を中央に埋め込んだプリズム型試験体の単軸引張载荷においてプリズム試験体の平均コンクリート応力が引張強度となりひび割れがはいつたときの σ_t 計算値を点線で示す。同図より、本研究で採用した試験体における曲げひび割れ発生直後の σ_t 計算値は、付着による曲げひび割れ発生時のそれとあまり差はないが、D200 試験体では、4、5本のひび割れがほぼ同時に発生した後、数の増加はない。D600、D800 試験体では、 $\sigma_t < 200 \text{ N/mm}^2$ 程度でひび割れはほぼ出そろい、その後の本数の増加は少ないことが分かる。

3.5 平均ひび割れ間隔の予測

図-13(a)に、D600 試験体の $\sigma_t = 200 \text{ N/mm}^2$ におけるひび割れ状況を示し、鉄筋位置で観測されたひび割れ位置を丸印で表している。また、同図(b)には以下に述べる、本研究で提案するひび割れ発生位置の予想図を示す。

まず、3.3 で定義した曲げひび割れの平均間隔は、D600、D800 試験体の結果からほぼ D/2 であった。この結果は、梁せいが 3m のものもある大型試験体の曲げ载荷実験結果⁵⁾でも指摘されており、また FEM 解析による結果⁶⁾においても示唆されている。それ故、曲げひび割れ間隔は D/2 と仮定し、その発生予想位置を図-13(b)に点線で表す。次に付着によるひび割れ間隔は、PRC 指針式がプリズム引張試験結果等に基づいて組み立てられているため、同式によって推定できると仮定し、図-13(b)中に指針式から算出される値(本実験では約 200mm)をもとに、予想ひび割れ位置を実線で表示した。曲げひび割れと付着ひび割れは、通常は本実験の場合のように、

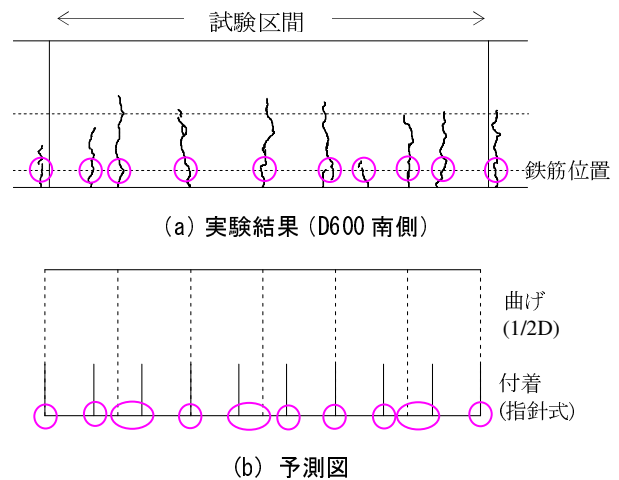


図-13 ひび割れ発生位置の推定図

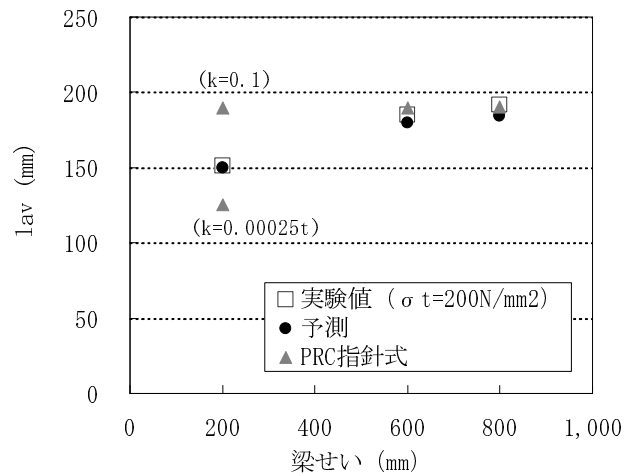


図-14 平均ひび割れ間隔におよぼす梁せいの影

その発生時期には余り差がなく、両ひび割れは相互に影響を与えながら発生・進展していくと推測される。それ故ここでは、いずれの試験体においても最小ひび割れ間隔が約 $3da \sim 4da$ (da ; 主筋径)であったため、両ひび割れの予想間隔差が $4da$ 以下のときには、ひび割れは一本のひび割れとして発生・進展すると仮定する。以上の方針にしたがって推定されたひび割れ位置予測図に図-13中の梁下部の丸印で示すが、ひび割れの位置および種類は

ほぼ予測していると考えられる。

図-14は、梁せいが異なる試験体に対する予測ひびわれ本数を、梁せいを横軸にとって示したものであるが、同図中には PRC 指針式による推定ひび割れ間隔も示されている。なお、D200 試験体の PRC 指針式による算定値は、係数 $k=0.00025t$ (t : スラブせい) を代入して算出した値も併記する。図-14 から、PRC 指針式とほぼ同程度となり、梁せいの増大によってひび割れ間隔が増大する実験結果を、本提案方法においても良好に推定していることが分かる。

3.6 平均ひび割れ幅と最大ひび割れ幅

図-15は、PRC 指針式で提示されている、平均ひび割れ幅 (w_{av}) 算定式、 $w_{av} = \epsilon_{tav} \cdot l_{av}$ の本実験結果に対する適用性を調べるため、実験データから求めた両者の関係を調べたものである。なお、図-16の場合も同様であるが、考慮しているひび割れは 3.3 項の採用ひび割れのみである。同図より、いずれの試験体においても、 $w_{av} = \epsilon_{tav} \cdot l_{av}$ の関係がほぼ成立することがわかる。

図-16は、横軸に σ_t をとって、 $1.5w_{av}$ と最大ひび割れ幅 (w_{max}) の関係を、D600 試験体を例にとり示したものである。この図から PRC 指針でも述べられているように、 $1.5w_{av}$ と w_{max} はほぼ一致することがわかる。この結果はどの試験体についても同様であった。

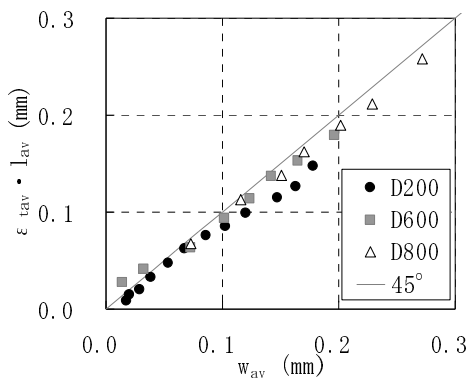


図-15 $w_{av} - \epsilon_{tav} \cdot l_{av}$ 関係

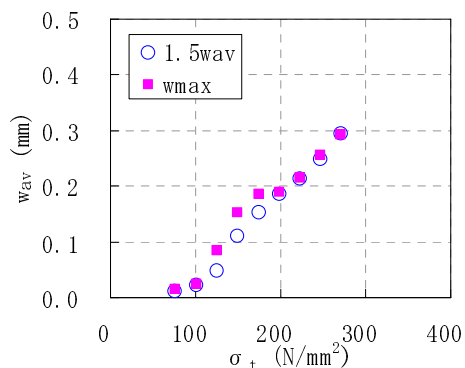


図-16 $1.5w_{av}$ と w_{max} の関係

4 まとめ

- 1) 従来の離散的な測定方法とは異なる、主筋位置の伸び量を連続的に測定する方法を開発した。また、ひび割れ幅を高精度のマイクロスコープによって測定することから、ひび割れ制御設計に必要な基礎データを得た。
- 2) テンションスティフニング効果に関係するコンクリート拘束ひずみ (ϵ_{cm})、および k_1k_2 におよぼす梁せいの影響を明確にした。すなわち、梁せいが大きくなると ϵ_{cm} および k_1k_2 は大きくなった。
- 3) 梁に生ずる曲げひび割れには、曲げモーメントに関係するひび割れと、主筋の付着に関係するひび割れがあり、曲げモーメントによるひび割れの間隔はほぼ $D/2$ (D : 梁せい) であった。
- 4) 梁の曲げひび割れは、曲げモーメントによるひび割れと主筋の付着によるひび割れとが相互に干渉して発生すると推測されるので、両ひび割れを考慮する平均ひび割れ間隔 (ひび割れ本数) の予測方法を提案し、その妥当性を示した。
- 5) PRC 指針で提示されている、平均ひび割れ算定式 ($w_{av} = \epsilon_{tav} \cdot l_{av}$)、および平均ひび割れ幅と最大ひび割れ幅の関係 ($1.5w_{av} = w_{max}$) は、大型試験体においても成立することを確認した。

謝辞

本研究を行うにあたり、大阪工業大学大学院生、森田真由美氏、当時建築学科卒論生、若井麻佑子氏・森本圭祐氏および中村哲徳氏から多大な協力を得た。また、PC 付着研究会の皆様には有益な議論を頂いた。ここに記して心より謝意を表する。

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コンクリート(Ⅲ種PC)構造設計・施工指針・同解説，2003
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書(設計編)，pp.102-104，2002
- 3) 日本建築学会：鉄筋コンクリート建物の耐久設計施工指針(案)・同解説，pp.79-86，2004
- 4) 角田 与史雄：鉄筋コンクリートの最大ひび割れ幅，コンクリート・ジャーナル，Vol.8，No.9，pp.1-10，1970.9
- 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月8日
- 6) 六車 熙，森田 伺郎，富田 幸次郎：曲げひび割れを生じた鉄筋コンクリートはり材の応力状態と変形に関する研究，日本建築学会論文報告集，第200号，pp.27-34，1972.10