

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 26 日現在

機関番号：34406

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560602

研究課題名（和文） 中・大型試験体による PRC 部材の曲げひび割れ性状制御設計の新展開に関する研究

研究課題名（英文） Characteristics of flexural cracks of large-scale pre-stressed reinforced concrete beams

研究代表者

中塚 侑 (NAKATSUKA TADASHI)

大阪工業大学・工学部・教授

研究者番号：60107133

研究成果の概要（和文）：プレストレスト鉄筋コンクリート（PRC）及び鉄筋コンクリート（RC）構造における設計のキーポイントは曲げひび割れ性状制御設計である。これまで小型の RC 梁試験、RC 角柱引張試験による検討しか行われてこなかった本課題に対し、実部材相当の大型 RC および PRC 梁試験を行い、同設計に不可欠な以下の成果を得た。①曲げひび割れ間隔は、梁せい（スケール）に依存する。②RC と PRC では、引張鉄筋応力-拘束コンクリートひずみ関係が全く異なることを示し、同関係に対する中立軸深さを用いた新定量化式を誘導した。③大型試験体によるコンクリートの収縮量は JIS 規定の小型角柱試験体の 1/2 程度以下である。

研究成果の概要（英文）：Evaluation of crack widths is one of important key points for performance design of pre-stressed reinforced concrete (PRC) beams and reinforced concrete (RC) beams. Owing to investigate characteristics and equations for estimating flexural crack spacing and strains of confining concrete, tests are carried out using large scale PRC and RC beams. Following main results are obtained. ①Spacing of flexural cracks depends on depths of beams. ②Equations to calculate strains of confining concrete using a new tensile reinforcement ratio taking into consideration of neutral axis depth of beam sections are induced. ③Shrinkage of large scale specimens is below about one half of that of small sized specimens specified by JIS.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2010 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2011 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,800,000	1,140,000	4,940,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学 ・ 建築構造・材料

キーワード：プレストレスト鉄筋コンクリート、曲げひび割れ性状制御設計、曲げひび割れ間隔、拘束コンクリートひずみ、大型試験体、収縮特性

1. 研究開始当初の背景

プレストレスト鉄筋コンクリート(PRC)構造、鉄筋コンクリート(RC)構造における設計のキーポイントは曲げひび割れ幅制御設計である。それ故、海外の諸規準や日本建築学会および土木学会の指針・示方書においても、設計ストーリーが提示されているが、いずれも小型のRC梁試験体や角柱RC引張試験体のデータに依存していて、実大に近い中型・大型試験体に対する適用性ならびに、これまで梁試験体として調べられていないPRC部材に対する適用性については未だ不明確な点が残る状況である。さらには、実大スケール部材の持続荷重下におけるひび割れ性状については、建築系ではほとんど調べられておらず、とりわけ影響が大きいと予想されるコンクリートの収縮のひび割れ幅に及ぼす影響については、大型試験体による検証がほとんど行われていないのが現状である。

2. 研究の目的

背景で述べたように、現状のコンクリート部材の曲げひび割れ幅制御設計においては、(1)曲げひび割れ性状に及ぼす部材スケールの影響が中・大型試験体によって十分検証されていない。(2)PRC部材に対する適用性がほとんど未検証である。ならびに(3)持続荷重下での曲げひび割れ性状、さらには、(4)小型試験体のデータとの相違が明らかにされている実大スケール試験体におけるコンクリートの収縮特性についても明確になっていない。これらを明確化することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) RCおよびPRC実大梁の曲げ試験

以下のような大型試験体 15 体の曲げ試験を行い、曲げひび割れ性状におよぼす梁せい、引張鉄筋比、コンクリート強度、プレストレスレベル等の影響を調べた。

①RC試験体：梁幅 (b) が 280mm のRC試験体で、PRC指針式によって算出される平均ひび割れ間隔 l_{av} が等しくなるように引張鉄筋とその配置を全く同じにした、梁せいの

みが異なる ($D=300, 400, 500, 600, 800\text{mm}$) 試験体とコンクリート強度 ($F_c=30, 80\text{N/mm}^2$) を実験要因に取り上げたもの。②断面 $b \times D$ が $310 \times 600\text{mm}$ の梁で引張鉄筋量のみを変化 ($p_t=0.7, 0.92, 1.17\%$) させたRC試験体。③梁幅が 280mm で梁せい D が 500, 600, 800mm のPRC試験体で、プレストレスレベル ($\sigma_p=0, 2.3 \sim 3.1, 7.0\text{N/mm}^2$) およびコンクリート強度 ($F_c=30, 80\text{N/mm}^2$) を変数としたもの。

荷重方法は図1に示すような単純梁の単調荷重である。

図2に示すような滑車とインバー線で構成される新方法によって、引張鉄筋位置の平均伸びを測定した。曲げひび割れ幅は $1/100\text{mm}$ の精度を持つマイクロscopeで測った。

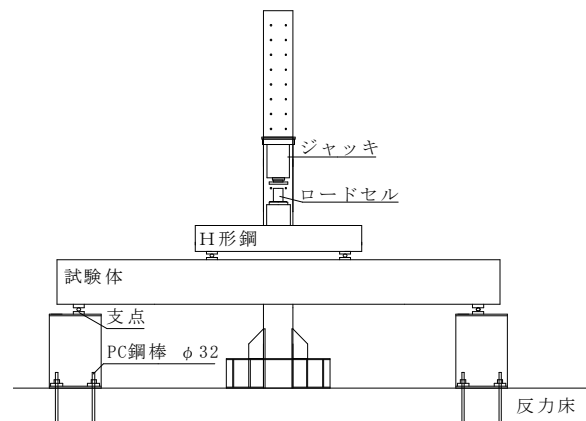


図1 荷重方法

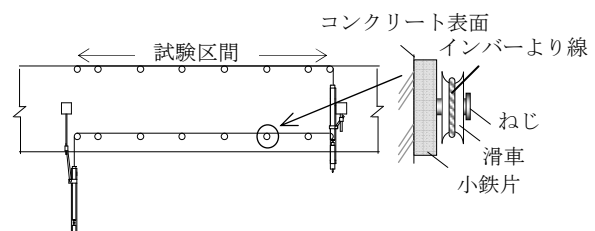


図2 滑車とインバー線による新測定方法

(2) 大型RC試験体による収縮特性試験

梁の幅×せい×長さが $310 \times 600 \times 2000\text{mm}$ の大型RC角柱試験体を用いて、主筋量および試験体内位置が収縮特性におよぼす影響、およびJIS規定の $10 \times 10 \times 400\text{mm}$ の標準試験体との比較から収縮量におよぼす体積表面積比の影響を調べた。

4. 研究成果

(1) RCおよびPRC実大梁の曲げ試験

①平均曲げひび割れ間隔

曲げ試験では、曲げモーメントがひび割れモーメント (M_{cr}) 近傍でまとまって発生し、ひび割れ高さおよびひび割れ幅を急激に進展させる、曲げ応力に起因するMひび割れと、より大きなモーメント時に曲げひび割れ間に発生し、その後のひび割れの進展が緩やかな主として鉄筋の付着に起因するMBひび割れとが観察された。Mひび割れが最大ひび割れ幅を示し、図3のように梁せいと密接な関係が見られたので、Mひび割れ幅推定に必要なひび割れ間隔として式(1)を得た。

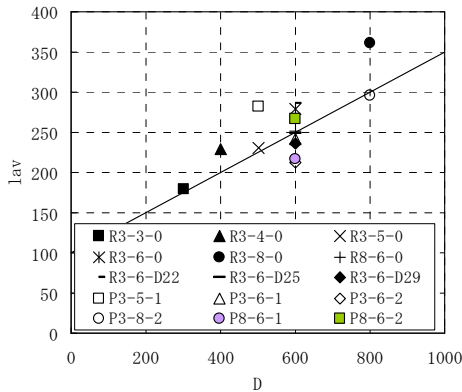


図3 平均ひび割れ間隔と梁せいの関係

$$l_{avm} = 0.25 \cdot D + 100 \text{ (mm)} \quad (1)$$

②拘束コンクリートひずみ (ϵ_{cm}) と引張鉄筋応力 (σ_t) の関係

図4はRC梁の $\epsilon_{cm} - \sigma_t$ 関係の例である。同図よりRCでは初期の直線区間(式(2))に続いてピークを示した後、急激に下降し、ほぼ一定値に収束する傾向を示した。下降勾配には引張鉄筋比 p_{te} の影響が見られたので式(3)で表示した。

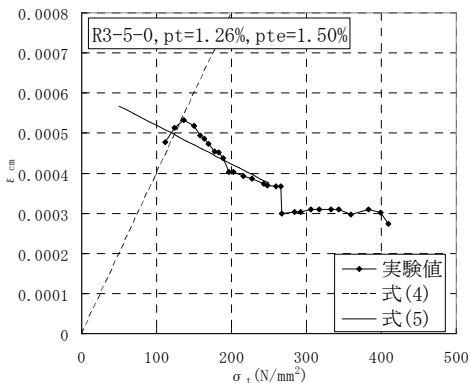


図4 RC梁での $\epsilon_{cm} - \sigma_t$ 関係の例

図5はPRC梁の $\epsilon_{cm} - \sigma_t$ 関係の例である。同図によれば、直線区間後のピーク以降はほぼ一定値を示す傾向が見られ、同値には

p_{te} の影響が見られたので式(4)で表現した。

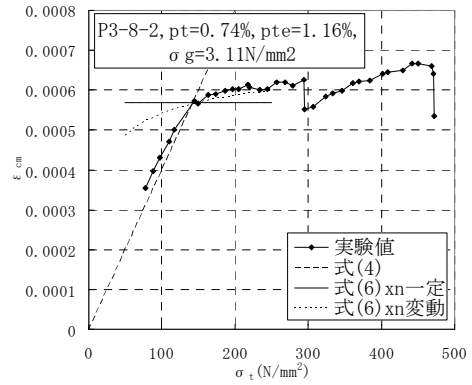


図5 PRC梁での $\epsilon_{cm} - \sigma_t$ 関係の例

・初期直線式 $\epsilon_{cm} = 4 \times 10^{-6} \cdot \sigma_t \quad (2)$

・ピーク以降式

RC: $\epsilon_{cm} = (250 - \sigma_t) \theta + 375 \times 10^{-6} \quad (3)$

$$\theta = 5.65 \times 10^{-7} / \sqrt{p_{te}} - 3.65 \times 10^{-6}$$

PRC: $\epsilon_{cm} = 4 \times 10^{-6} / p_{te} + 225 \times 10^{-6} \quad (4)$

③最大曲げひび割れ幅 W_{max}

曲げひび割れ幅制御設計では最大ひび割れ幅が重要である。 $w_{av} = l_{av} \times \epsilon_{tav} = l_{av} \times (\sigma_t / E - \epsilon_{cm})$ の関係は概ね成り立っていることが確認されているので、本研究で提案する式(1)、(2)、(3)、(4)により計算された平均ひび割れ幅 (w_{av}) を横軸に、実験より得られた最大ひび割れ幅 (w_{max}) を縦軸に取って比較したものが図6、7である。

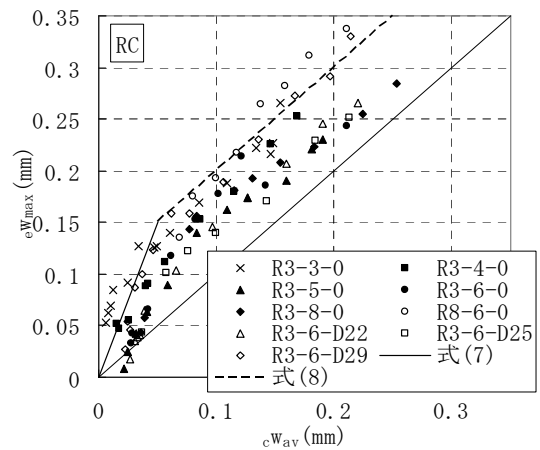


図6 平均ひび割れ幅計算値 ($c_{w_{av}}$) と最大ひび割れ幅実験値 ($e_{w_{max}}$) との関係 (RC)

図6のRC試験体では、図中に破線で示した原点と(0.05, 0.15)点を結ぶ直線および同点を通る45°線の実験結果がほぼ包絡されている。図7のPRC試験体でも、同2直線で包

絡される同様の結果が得られているので、本研究では、 w_{max} に対する w_{av} の倍率を式(5)、(6)で与えることとした。なお、 $w_{av} \leq 0.05\text{mm}$ の区間でのバラツキの大きさは、同区間が大略 $\sigma_t < 100\text{N/mm}^2$ に対応することから、図4、5からもわかるように、通常、曲げひび割れ発生付近であることによると考えられる。

$$w_{max} = 3 \cdot w_{av} \quad (w_{av} \leq 0.05\text{mm}) \quad (5)$$

$$w_{max} = w_{av} + 0.1 \quad (w_{av} > 0.05\text{mm}) \quad (6)$$

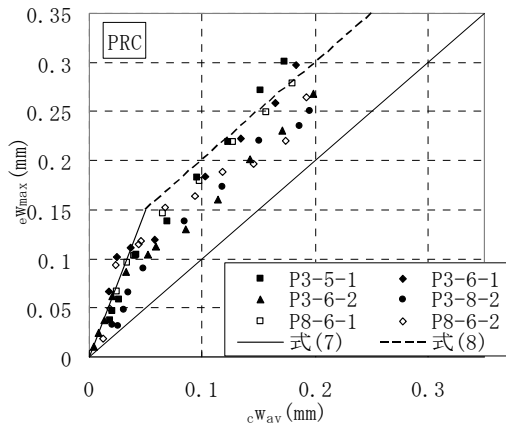


図7 平均ひび割れ幅計算値 (w_{av}) と最大ひび割れ幅実験値 (w_{max}) との関係 (PRC)

④ RCとPRCの区分

前項では、ひび割れ幅制御設計のための $\epsilon_{cm} - \sigma_t$ 関係がRCとPRCで異なることが明らかにされたので、その適用にあたってはRCとPRCの境界の明確化が不可欠である。しかし、これまで議論されたことはない。

本研究での p_t が過大なRC試験体では、他のRC試験体の $\epsilon_{cm} - \sigma_t$ 関係と異なってピークを示さなかった。また、平均プレストレス (σ_o) が作用するPRC試験体でもピークを持たない $\epsilon_{cm} - \sigma_t$ 関係であった。それ故、ピーク以降の $\epsilon_{cm} - \sigma_t$ 関係の差異が図8、9に示すような曲げモーメントM-曲率 Φ 関係における応力ジャンピング現象に関係するとの推測から考察した。

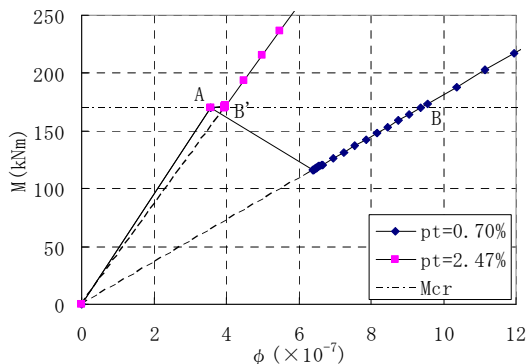


図8 M- Φ 関係におよぼす p_t の影響

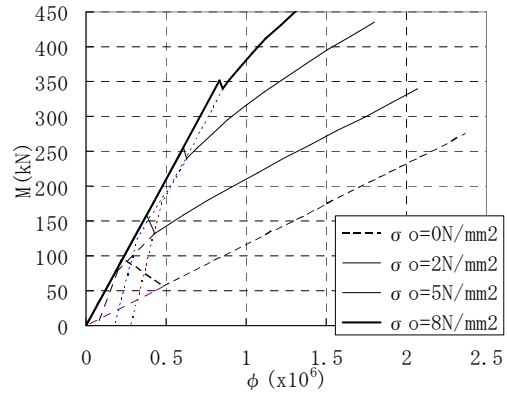


図9 M- Φ 関係におよぼす σ_o の影響

図8のRCの場合、通常の引張鉄筋比 p_t では、曲げひび割れ後曲率が急激に増大するジャンピング現象を示すのに対し、 p_t が過大な場合はひび割れ前後で Φ は変化しない。一方、同じ p_t をもつが σ_o が異なる図9のPRCの場合、 σ_o が小さいケースでは曲げひび割れ発生前後で曲率変化を起こすが、 σ_o の大きいケースでは曲率は変化しない。

それ故、応力ジャンピング (RCとPRCの区分) の発生条件が、図10に示すような、断面引張縁応力が σ_t となった時のひび割れモーメント M_{cr} と、引張鉄筋位置コンクリート応力が σ_o となったときのMが等しくなる条件からジャンピングの発生限界が与えられると仮定した。

図11は、縦軸に $\sigma_o / c \sigma_t$ 、横軸に p_t をとつ

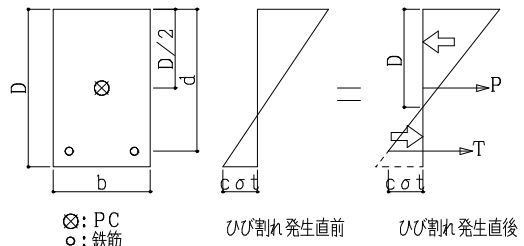


図10 ジャンピング現象に対する解析仮定

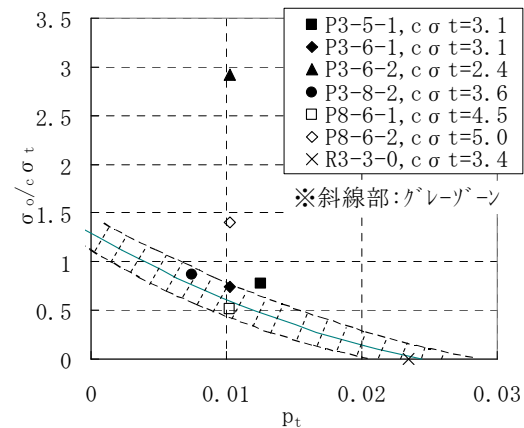


図11 RCとPRCの境界曲線

て、図 10 の仮定から得られた曲線を示したものであるが、コンクリートの引張強度のバラツキに起因すると思われるグレーゾーンを想定すれば、同曲線の上部にほとんどの PRC 試験体が位置して、実験結果とほぼ対応する結果になっている。

(2) 大型 RC 試験体による収縮特性試験

JIS 規定の小型角柱試験体 (10×10×400mm) と大型角柱試験体 (310×600×2000mm) によるコンクリートの収縮量測定を行い、次のような成果を得た。なお、持続荷重を受ける PRC 梁のたわみ・ひび割れ性状も予備的に調べたが、計測装置の不調から十分な資料は今回得られなかった。

- ① JIS 規定の小型角柱試験体の乾燥収縮量は、材齢 180 日程度では、中・大型角柱試験体のそれに比べ約 2 倍程度大きく、実部材の素材性質を与えるにすぎない。
- ② 大型試験体の収縮ひずみは、建築学会の収縮ひび割れ制御設計の指針式によってほぼ推定できた。
- ③ 大型の無筋試験体に対する有筋試験体の収縮ひずみ比は 0.75～0.8 程度で、主筋によるコンクリートの収縮ひずみの拘束が認められた。
- ④ コンクリート打込み側の梁断面上端部分での収縮ひずみと断面中央部・下端のそれとの差は 10% 程度と大きくない。

(3) 研究成果のまとめ

- ① 曲げひび割れは、曲げモーメントによる引張応力に起因する M ひび割れと鉄筋とコンクリートの付着による MB ひび割れに分類出来る。
- ② M ひび割れの平均間隔 l_{av} は、日本建築学会の現行 PRC 指針などで示されるように断面の配筋状態に依存するのではなく、梁せい D に依存して大きくなることを明らかにし、算定式として式(1)を誘導した。
- ③ PRC 指針では、RC と PRC の引張鉄筋応力 (σ_t) - 拘束ひずみ (ε_{cm}) 関係に同一の算定式を提示しているが、 $\sigma_t - \varepsilon_{cm}$ 関係は、RC と PRC では大きく異なり、指針式によって PRC 試験体の実験結果は全く推定できないことを示した。
- ④ RC および PRC に対する $\sigma_t - \varepsilon_{cm}$ 関係をそれぞれ提案し、それら提案式を用いれば最大ひび割れ幅実験値を適切な安全率を持って推定できる手法を示した。
- ⑤ RC と PRC の $\sigma_t - \varepsilon_{cm}$ 関係の相違を、曲

げモーメント-曲率関係における応力ジャンピング現象と関係づけて説明し、RC と PRC の境界条件を提案した。

- ⑥ JIS 規定の小型角柱試験体の収縮量は、材料特性の指標とはなるが、部材設計に必要な収縮量は体積表面積比を考慮した、建築学会の収縮ひび割れ制御設計の指針式などによる必要がある。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① 竹内寿文、中塚 侑：PRC と RC 梁の曲げひび割れ幅推定に関する研究、プレストレストコンクリート技術協会第 21 回シンポジウム論文集(掲載決定)、査読有、巻・頁未定、2012、DOI なし
- ② 竹内寿文、中塚 侑、佐々木克典、坂田博史：RC 梁のひび割れ間拘束コンクリートひずみの定量化に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、査読有、Vol. 33 No. 2、pp. 553-558、2011、DOI なし
- ③ 竹内寿文、森田真由美、中塚 侑、坂田博史：PRC 梁および RC 梁の曲げひび割れ幅推定に関する基礎研究、コンクリート工学年次論文集、査読有、Vol. 32、No. 2、pp. 481-486、2010、DOI なし
- ④ 森田真由美、竹内寿文、中塚 侑、坂田博史：PRC および RC 梁の曲げひび割れの間隔と幅に関する実験研究、コンクリート工学年次論文集、査読有、Vol. 32、No. 2、pp. 475-480、2010、DOI なし

[学会発表] (計 10 件)

- ① 馬場望、中塚 侑：大型試験体による RC 梁の収縮特性についての実験的検討、日本建築学会大会学術講演会、2012. 9. 14、名古屋大学
- ② 中塚 侑ほか 8 名：大型 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 1～その 4)、日本建築学会大会学術講演会、2011. 8. 25、早稲田大学
- ③ 中塚 侑、寒川勝彦、古林桂太、島田安章、竹内寿文、森田真由美、坂田博史：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考察(その 1～その 5)、日本建築学会大会学術講演会、2010. 9. 9、富山大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中塚 侑 (NAKATSUKA TADASHI)
大阪工業大学・工学部・教授
研究者番号：60107133

(2) 研究分担者
なし