

論文 プレストレスト（鉄筋）コンクリート曲げ部材のひび割れ性状に関する解析的検討

小島 一高^{*1}・中塚 侑^{*2}・坂田 博史^{*3}

要旨：最近、アンボンド鋼材や高強度コンクリートが多用される趨勢がある。しかし、付着特性、コンクリート強度、プレストレス量などがPC～RC部材設計上の重要な指標であるひび割れ性状におよぼす影響については十分解明されていない。本研究は、非線形2次元有限要素法解析によって上記要因が部材の曲げひび割れ間隔におよぼす影響を、主に付着に注目して考察したもので、まず既往の実験結果によって本FEM解析の妥当性を示した。同時に、付着強度とコンクリート引張強度の相対関係および付着剛性はひび割れ間隔に大きな影響を与えるが、プレストレス量の影響度は低いことなどを解析的に明らかにした。

キーワード：PRC, PC, 有限要素法, 曲げひび割れ間隔, 付着, コンクリート強度

1. はじめに

プレストレストコンクリート(PC)～鉄筋コンクリート(RC)部材の設計において、曲げひび割れ性状は使用限界状態のひび割れ幅ばかりでなく、終局限界状態の曲げ圧縮部コンクリートの力学特性にも関係する¹⁾重要な設計指標である。一方最近、アンボンド方式や各種の特性が得られるシース・グラウト方式などによって、付着特性が異形鉄筋で代表されるような固定的なもので無くなりつつある。また高強度コンクリートなどが多用される趨勢にあるが、PC～RC部材のひび割れ性状におよぼす付着特性、コンクリート強度、プレストレス量などの影響は論理的に十分明確にされていない。

本研究は、分布ひび割れ系の非線形2次元有限要素法(FEM)解析によって、それら諸要因が部材のひび割れ性状におよぼす影響を明らかにする第1段階として、曲げひび割れ間隔におよぼす影響について調べたものである。

2. 解析方法の概要

2.1 要素分割

本解析では、非線形2次元有限要素法解析ソフト(TOTAL-RC)を使用した。コンクリートには8節点アイソパラメトリック平面応力要素、鉄筋には弾塑性トラス要素を用い、鉄筋とコンクリートとの間には6節点アイソパラメトリック板ボンド要素を設けて付着破壊を考慮するもので、要素分割の状況を図-1に示す。

2.2 材料特性

本解析で想定したコンクリート、および付着の材料特性を図-2に示す。コンクリートの圧縮応力上昇部分にはKupferのモデルを用い、最大圧縮強度以降は軟化を考慮した2直線モデルとした。圧縮破壊の発生基準には2軸応力場に対する大沼ら²⁾によるものを採用した。引張領域では、ひび割れ発生は最大引張応力基準に従うとし、ひび割れ発生後の引張軟化特性、および除荷・再結モデルは、吉川らのモデル³⁾を用いて、分布ひび割れモデルでのひび割れの局所化状態を表現した。なお、破壊エネルギーは土木学会式⁴⁾で与えられるとした。鉄筋の降伏条件式にはVon-Misesの降伏条件を用いた。鉄筋とコンクリート界面に設けた板ボンド要素のせん断応力

*1 大阪大学大学院 工学研究科建築工学専攻 (正会員)

*2 大阪大学大学院 工学研究科建築工学専攻助教授 工博 (正会員)

*3 建研(株) 事業部大阪設計部 (正会員)

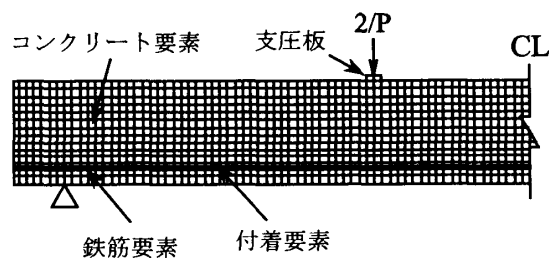
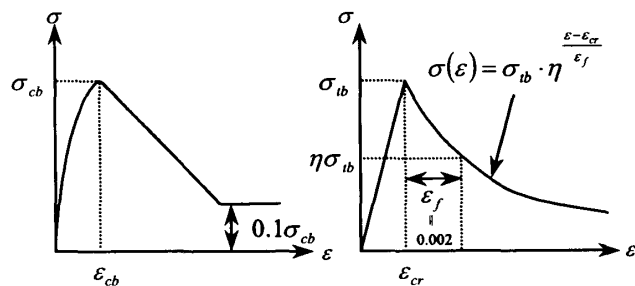


図-1 要素分割図



(a) コンクリート圧縮特性 (b) コンクリート引張特性

(c) 鉄筋とコンクリートの付着特性

図-2 材料特性

τ_b (N/mm²)—せん断歪 γ 関係は図-2 (c) のようにバイリニア型とした。

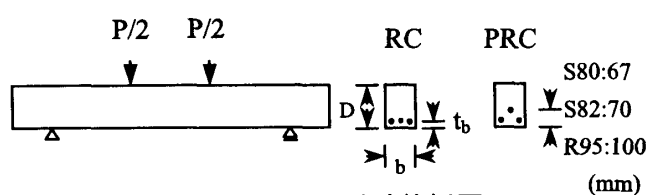


図-3 試験体概要

3. 解析方法の妥当性の検討

3.1 解析対象試験体の概要

FEM 解析の妥当性を検討するために用いた既往研究での試験体 (S80⁶⁾, S82⁷⁾, MO63⁸⁾, R95⁹⁾, MA94¹⁰⁾) は、図-3 に示すように、長方形断面を有する PC~PRC~RC の単純梁である。断面等の詳細は表-1 に示すが、鉄筋種は D6~D22 で、コンクリート強度 σ_{cb} は 21.2~55.2(N/mm²), 引張鉄筋比 p_t は 0.13~2.7%, 引張有効鉄筋比 ($p_e = a_t / 2t_b \cdot b$) は 0.8~7.5% である。また、平均プレストレスレベル ($\sigma_g / \sigma_{cb} = 0 \sim 0.14$), 2 段配筋などもファクターとなっている。

解析に当たっては、分割要素大きさを横×高さが 15mm×15mm 程度になるように設定した。また、殆どの試験体の σ_{cb} が 30(N/mm²) 程度なので、付着特性は既往の鉄筋および PC 鋼材の片引き試験の付着応力 τ (N/mm²)—すべり量 S (mm) の関係⁵⁾を参考にして定めた。すなわち付着強度 τ_{bb} は異形鉄筋 7 (N/mm²), 丸鋼で 3 (N/mm²), PC 鋼棒—グラウトで 1 (N/mm²) とし、せん断付着剛性 G_r はいずれも 6 (N/mm²) とした。 σ_{cb} および鉄

表-1 各試験体モデルの概要

試験体 シリー ズ名	試験体 数(内 PRC,PC の数)	等曲げ スパン 長	梁幅 (b)	梁 せい (D)	t_b ※ ¹	コンク リート 強度	引張鉄筋			備考 (実験要因等)
							種類と 本数	鉄筋比		
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(MPa)		P_t (%)	P_e (%)	
S80	5(4)	600	120	200	30	30.4	2-D6~ 2-D13	0.13~ 1.2	0.8~ 3.5	P_e, σ_g
S82	5(4)	600	120	240	30	33.7	2-D10~ 2-D22	0.64~ 2.6	2.0~ 7.3	P_e, σ_g
MO63	7	700	200	250	30	28.3	1-D16~ 3-D19	0.65~ 2.0	2.4~ 7.2	P_e
R95	17(2)	800	130~ 170	200~ 500	38~ 68.5	21.2~ 55.2	2-D13~ 2-D16	0.59~ 2.1	1.8~ 5.5	P_e, σ_{cb} , 梁せい, t_b, σ_g , 二段配筋
MA94	6	1500	150	300	35~ 51.7	29.1~ 31.3	2-D13~ 2-D22	0.64~ 2.7	2.4~ 7.5	P_e , 二段配筋

※1 t_b : 引張縁—鉄筋重心距離

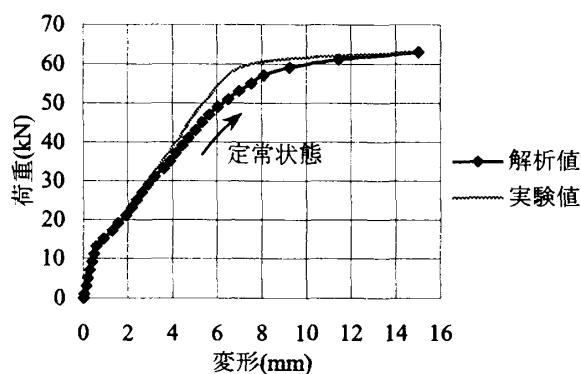


図-4 S80 RC 試験体の荷重-変形関係

筋降伏強度には実験値を使用した。また、解析は荷重増分を $\Delta P=2$ (kN) (MA94の一部は4(kN))とし、等曲げ区間で主ひび割れ間隔が変化しなくなったときの平均ひび割れ間隔 l_{av} を求めた。

3.2 解析結果と考察

(1) 荷重-変形関係：図-4に本解析で得られた試験体の荷重-変形の例を示すが、対象とするひび割れ定常状態付近まで実験結果を良好に追跡していると思われる。

(2) ひび割れ間隔：図-5は、各試験体の実験値とFEM解析で得た解析値を比較したものである。同図によれば、若干対応の悪いものも見られるが、解析値は実験値を大略 $\pm 20\%$ 以内の精度で推定できている。この精度は図-6に示すPRC指針式¹¹⁾の精度(同式誘導にあたって用いたデータ(S80,MO63)も含まれている)と同程度であり、このことから本解析法は十分妥当なものと判断される。

4. 平均ひび割れ間隔 (l_{av}) に対する各種要因の影響

4.1 解析概要

断面が $120\text{mm} \times 200\text{mm}$ でスパンが 1800mm の梁(図-3参照)を用いて、鉄筋の付着特性(強度 τ_{bb} 、せん断剛性 G_r)、コンクリート(もしくはグラウト)の引張強度 σ_{ib} 、平均プレストレス量 σ_g がPRC~RC部材の平均ひび割れ間隔におよぼす影響を、本FEM解析によって調べた。

取り上げた解析要因と水準を表-2に示す。

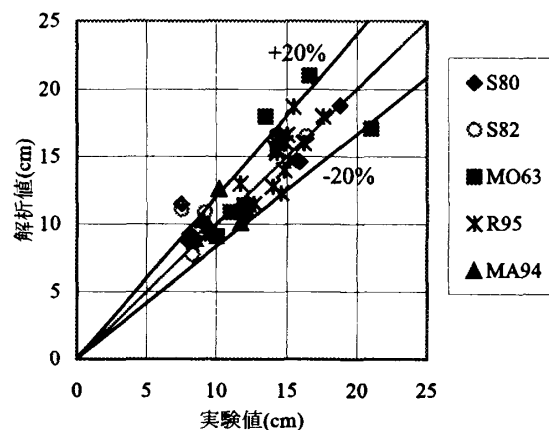


図-5 解析結果の対応性

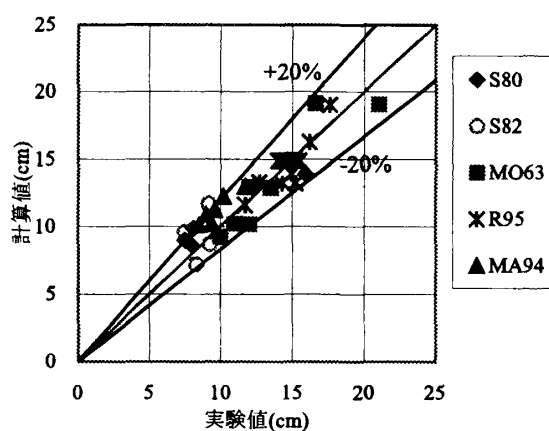
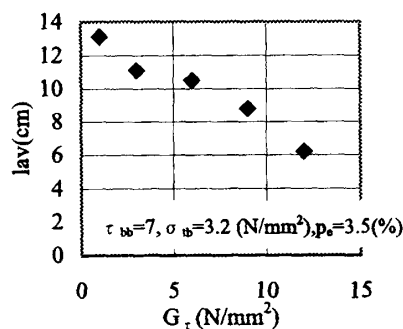
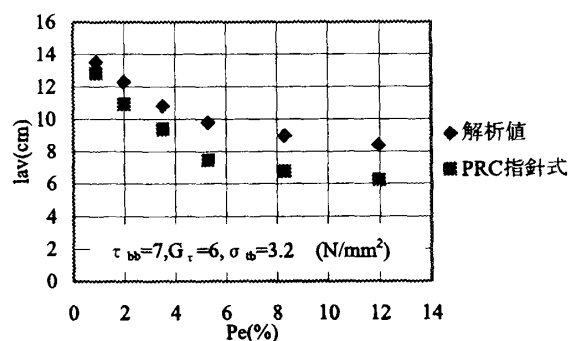


図-6 PRC 指針による算定式の対応性

なお、その他の必要力学特性は3.妥当性の検討に用いた試験体S80の値を用いた。すなわち、圧縮強度が 30.4 (N/mm²)、ヤング係数 2.64×10^4 (N/mm²)のコンクリート、及び2-D13とD6が配筋された断面を用いた。なお、平均プレストレス量 σ_g についての解析の場合には2-D10をもつ断面を用いた。また等曲げ区間内の要素寸法は横 $\times$ 高さを $15(\text{mm}) \times 12 \sim 15(\text{mm})$ とした。

表-2 解析要因一覧

解析要因	パラメータ
付着強度 τ_{bb} (N/mm ²)	0.01, 0.1, 1, 1.5, 2, 4, 7
せん断付着剛性 G_r (N/mm ²)	1, 3, 6, 9, 12
引張有効鉄筋比 p_c (%) (鉄筋種数)	1.8, 2.8, 3.5, 5.3, 8.3, 12 (2-D6~3-D19)
引張強度 σ_{ib} (N/mm ²)	2.4, 3.2, 4, 5, 6, 7, 10, 12, 15
平均プレストレスレベル σ_g / σ_{cb}	0 ~ 0.14

図-7 せん断付着剛性 G_r と l_{av} との関係図-8 引張有効鉄筋比 p_e と l_{av} との関係

4.2 結果および考察

(1) せん断付着剛性 (G_r) と引張有効鉄筋比 (p_e) の影響

図-7は、解析梁において付着要素の $\tau_b - \gamma$ 関係における勾配 G_r のみが異なるとき、 l_{av} がどのように変化するかを調べたものである。 G_r はグラウト（コンクリート）・鉄筋間の $\tau - s$ 関係の剛性および総周長（引張鉄筋量）に関係する。同図によれば、 G_r の増加に対し l_{av} はほぼ線形的に減少する傾向が見られる。これは、付着剛性が大きい場合、すべり変位が小さくても大きな付着応力が伝達されるため、コンクリートが引張強度に達する定着長が短くなるためと考えられる。図-8は、付着剛性と関連する引張有効鉄筋比 p_e と l_{av} との関係を示したものである。同図中には式(1)に示す PRC 指針式¹¹⁾ による結果も示しているが、 p_e の増大に対する l_{av} の減少傾向はほぼ一致している。

$$l_{av} = 2(c + s/10) + 0.1\phi/p_e \quad (1)$$

(c はコンクリートの側面と底面のかぶり厚さの

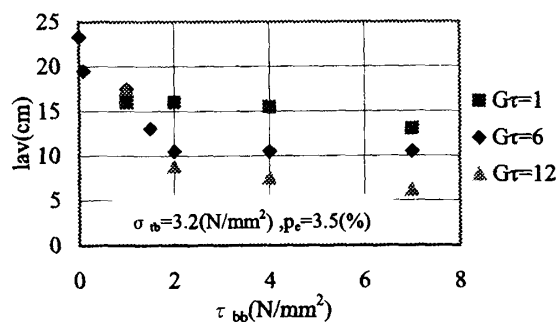
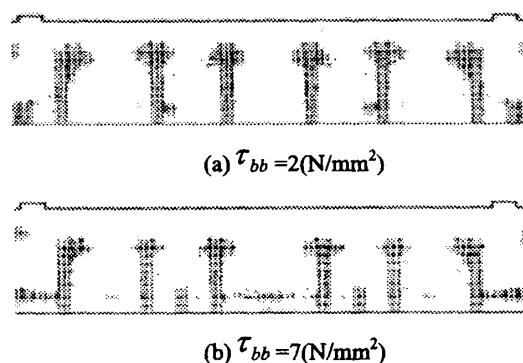
図-9 付着強度 τ_{bb} と l_{av} との関係

図-10 付着強度によるひび割れ性状の違い

平均、 s は鉄筋の中心間隔、 ϕ は鉄筋の周長)

(2) 付着強度 (τ_{bb}) の影響

図-9は、断面および引張コンクリート強度は同じだが、鉄筋がシースを介して配筋されて充填グラウト強度のみが異なる場合のように、付着強度 τ_{bb} が変化するとき、 l_{av} が τ_{bb} によって、どのように変化するかを、せん断付着剛性 G_r をパラメータにとって示したものである。同図によれば、いずれの G_r の時でも、 l_{av} は τ_{bb} の増加によって減少するが、 G_r に依存するある τ_{bb} 以上になるとほぼ一定値を示す傾向が見られる。これは、 τ_{bb} が増大しても鉄筋周囲のコンクリートが引張破壊して、ひび割れ区間での平均的な付着応力が低下することに起因する現象と推測される。また図-10は、図-9の同じせん断付着剛性 ($G_r=6$ (N/mm²)) において、 l_{av} がほぼ一定となる付着強度範囲で、付着強度のみが異なる梁の同一鉄筋応力時のひび割れ状況を示したものであるが、 τ_{bb} の増加に対し、主ひび割れ間の2次的ひび割れが増加していることが見られる。このことは、コンクリートの引張強度に対し付

着強度が相対的に大きい場合、鉄筋周囲のコンクリートに付着を介して十分な引張応力が伝達されて 2 次的ひび割れが発生することを推測させる。

(2) コンクリート引張強度(σ_{tb})の影響

図-11 は、付着特性が同一で σ_{tb} のみが増加するとき、 l_{av} がどのように変化するかを、付着強度 τ_{bb} をパラメータとして示したものである。同図から次のような傾向が見られる。[1] τ_{bb} が同じならば、 σ_{tb} が小さいほど l_{av} は小になると推測されるが、 σ_{tb} がある強度に達するまで l_{av} は殆ど変化しない。この結果は、鉄筋が同時打ちされて τ_{bb} が比較的高い $Fc30(N/mm^2)$ 程度のコンクリートを対象として導かれた PRC 指針の l_{av} 式 (式(1)参照) でコンクリート強度がファクターになっていないことに符合している。[2] σ_{tb} がさらに増大すると l_{av} は急増する。これは、 τ_{bb} に対し σ_{tb} が高いためにコンクリートが引張破壊する前に付着特性が塑性化して、必要な鉄筋張力を確保するための区間を増加させるためと考えられる。[3] σ_{tb} が τ_{bb} に比べ相対的に非常に大きい場合、 l_{av} は τ_{bb} が殆ど零 ($0.01(N/mm^2)$) の場合のそれに収束する傾向が見られる。[4] l_{av} の変化点に対応する σ_{tb} は τ_{bb} が小さいほど小さい傾向が見られる。

なお、図-11 中の τ_{bb} が殆ど零の場合、 σ_{tb} の増大に対して l_{av} が殆ど変化しない区間が見られるが、これは付着によらずとも、ひび割れ位置断面におけるコンクリートの曲げ圧縮力によってコンクリートに曲げひび割れが生ずることを示唆していると思われる。

図-12 は、同じ τ_{bb} ($7(N/mm^2)$) において σ_{tb} が異なるときのひび割れ性状を比較したものであるが、同図からも上記[1]～[4]の現象は、4.2(1)で述べたように、付着強度とコンクリート引張強度の相対関係に依存するものと推測される。図-11,12 の結果はシース・グラウト法によって、ひび割れ間隔が制御できることを示唆している。

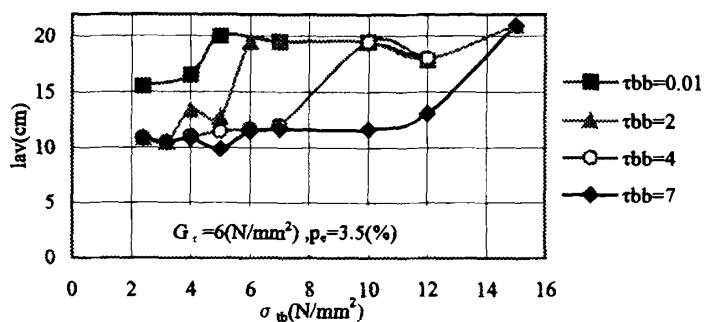


図-11 引張強度 σ_{tb} と l_{av} の関係

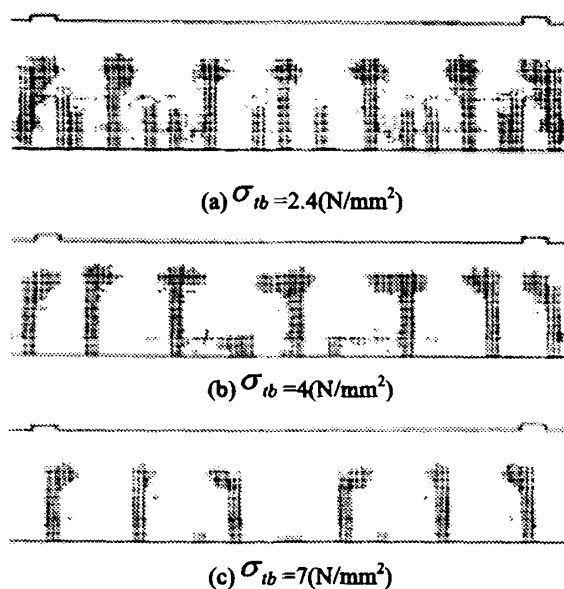
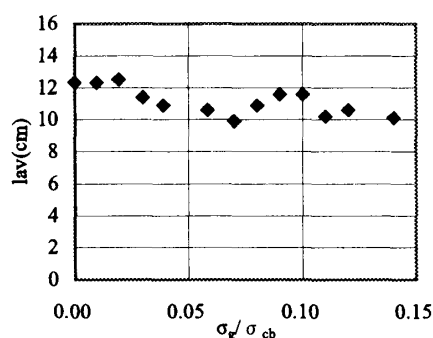
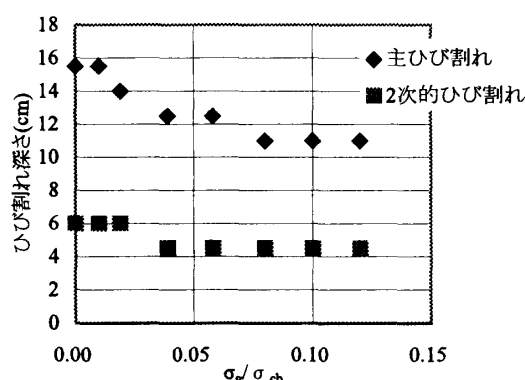


図-12 引張強度によるひび割れ性状の違い

(4) 平均プレストレス量(σ_g)の影響

図-13 は、アンボンド鋼材によって同一 RC 梁断面の核半径位置に、プレストレス力を作させたとき、平均プレストレス量 σ_g の増大による l_{av} の変化を、鉄筋張力同一時について調べたものである。 σ_g の増加による中立軸深さ x_n の増大によって、2 次的ひび割れの一部が主ひび割れ化し主ひび割れ本数の増加が期待されるが、同図によれば l_{av} は σ_g の影響を余り受けず、既往の研究結果⁸⁾と符合する。これは図-14 に示すように、主ひび割れおよび 2 次的ひび割れの高さが双方とも σ_g の増加に従って減少し、引張鉄筋に起因する主ひび割れ性状には影響しなかったためと推測される。

図-13 σ_g と l_{av} の関係図-14 σ_g と ひび割れ深さの関係

5. まとめ

分布ひび割れ系の非線形 2 次元有限要素法 (FEM) 解析による PC ～RC 部材の曲げひび割れ間隔に対する検討から以下の知見を得た。

- 1) 既往の PC ～RC 単純梁実験結果を用いて、本 FEM 解析による平均ひび割れ間隔 l_{av} の推定は、[1]PRC 指針等が特徴とする l_{av} にコンクリート引張強度 σ_{tb} が関係しない傾向、および [2]PRC 指針式と同程度の推定精度を有することを示した。
- 2) l_{av} には、付着強度 τ_{bb} と σ_{tb} の相対関係によって、 τ_{bb} と σ_{tb} に関わらずほぼ一定となる領域、 τ_{bb} と σ_{tb} に関係して増加する領域が存在することを示した。
- 3) l_{av} が σ_{tb} に関係しない理由として、 τ_{bb} と σ_{tb} の相対関係に密接に関係する鉄筋周辺のコンクリート (グラウト) の 2 次的ひび割れによる平均的な付着応力の低下が考えられる。
- 4) プレストレスの増大は、主ひび割れおよび 2

次的ひび割れ深さのいずれも減少させるので、 l_{av} には殆ど関係しないと考えられる。

謝辞：本研究は PC 付着研究会・FEM 解析 WG

(構成：大阪大学助教授:中塚佑, オリエンタル建設(株), (株)ピーエス三菱, (株)フドウ建研) の共同研究として行ったものである。また(株)トータル・インフォメーション・サービスには種々ご配慮を頂いた。付記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 中川明徳, 中塚佑, 大西広朗: 圧着型 PC 梁の塑性ヒンジ機構に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集 Vol25-2, pp721-726, 2003
- 2) 岩崎訓明, 西林新蔵, 青柳征夫: 新体系土木工学 29 フレッシュコンクリート・硬化コンクリート, 技報堂出版, pp.107
- 3) 吉川弘道, 西藤厚, 金刀督鈍: 引張強度の空間的変動を考慮したコンクリートの FEM 破壊シミュレーション, コンクリート工学論文報告集, 第7巻第2号, pp.103~117, 1996
- 4) 日本土木学会: 土木学会コンクリート標準示方書 構造性能照査編, p27
- 5) 異形鉄筋コンクリート設計法研究会: 異形鉄筋コンクリート設計法, 技報堂, pp.26~27, 1971
- 6) 鈴木計夫, 大野義照, 佐田裕之: プレストレスト鉄筋コンクリートはりの曲げ性状について, コンクリート工学年次講演会講演論文集(第2回), pp.385~388, 1980
- 7) 鈴木計夫, 大野義照, 姫野洋一: PRC 梁部材の繰返し荷重下の曲げひび割れ性状に関する実験的研究, 日本建築学会近畿支部研究報告集, pp.145~148, 1982.6
- 8) 六車熙, 森田司郎: 鉄筋コンクリート梁の変形ときれつ, 日本建築学会論文報告集, 第90号, pp13~18, 1963.9
- 9) 劉鍵, 大野義照, 李振宝, 鈴木計夫: 鉄筋コンクリート梁の曲げひび割れ幅に及ぼす各種要因の影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.17, No2, pp1019~1024, 1995
- 10) 趙唯堅, 丸山久一: 多段配筋を有する鉄筋コンクリートはりの曲げひび割れ性状に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.490/V-23, pp.135~145, 1994.5
- 11) 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