

論 文

[2141] 繊維補強材の付着性状に関する解析的研究

正会員○谷垣 正治(三井建設技術研究所)

同 岡本 直 (三井建設技術開発推進部)

同 蓮尾 孝一(三井建設技術研究所)

1. はじめに

繊維補強材をコンクリート部材の補強筋として用いる場合、繊維補強材の弾性係数だけでなくコンクリートと繊維補強材の付着特性を把握しておくことが重要である。補強材の付着特性は、定着に関する付着、トラス機構によってせん断伝達する際に主筋に要求される付着、引張域においてコンクリートからの引張協力効果を得るための付着、プレテンション緊張材として用いる場合の伝達性能に関する付着の4つに大別することができる。ここでは、繊維補強材を用いたコンクリート曲げ部材の剛性評価ならびに曲げひびわれ巾評価において重要と考えられるコンクリートの引張協力効果を対象として、これを解析的に把握することを目的としている。解析には、繊維補強材とコンクリートとの付着応力-すべり関係をボンドリンク要素で表現したFEM解析を用い、繊維補強材の弾性係数ならびに付着応力がコンクリートの引張協力効果に及ぼす影響について検討した。

2. ボンドリンク要素モデルの設定

本解析に用いる繊維補強材のボンドリンク要素の定数を設定するため、図-1に示す補強材の引抜き付着試験についてFEM解析を行い、実験結果¹⁾と比較した。実験および解析に用いた繊維補強材の諸元を表-1に示す。なおヤング率は、ワイヤーストレインゲージにより補強材のひずみを測定し、求めた。実験に用いられている繊維補強材は、アラミド繊維および炭素繊維を組紐状に編んで樹脂で硬化させたFRP棒材、およびその表面に珪砂を接着させたものである。組紐状繊維補強材の表面形状を図-2に示す。図-3に解析モデルを示す。FEM解析における材軸直交方向断面は、立方体供試体の内接円と考え、軸対称モデルを用いて平面ひずみ状態で解析した。図-4に、ボンドリンク要素の付着応力とすべりの関係を示す。BWで示す要素は、表面に珪砂がない組紐状補強材に対して設定されたものであり、その第一剛性 $K_0 = 2,200 \text{ (kgf/cm}^3\text{)}$ 、

表-1 繊維補強材の諸元

補強材	繊維	直 径 (cm)	断面積 (cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)	ヤング率 (kgf/cm ²)
K64	アラミド	0.8	0.5	12800	0.64×10^6
C64	炭素	0.8	0.5	12800	1.10×10^6
K64S	アラミド	0.9	0.5	12800	0.64×10^6
C64S	炭素	0.9	0.5	12800	1.10×10^6

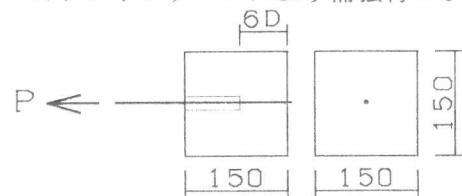


図-1 引抜き付着試験



図-2 繊維補強材の形状

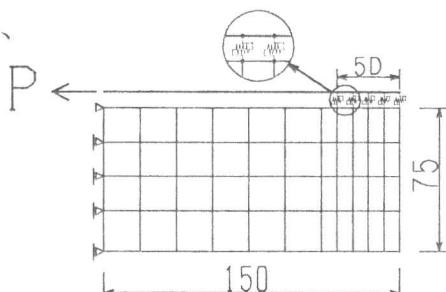


図-3 引抜き付着解析モデル

第一折れ点での付着応力度 $\tau_y = 25 \text{ (kgf/cm}^2)$ 、第二剛性 $\alpha \cdot K_0 = 345 \text{ (kgf/cm}^2)$ である。また、B F で示す要素は、表面に硅砂を付着させた組紐状補強材に対して設定されたものであり、 $K_0 = 10,000 \text{ (kgf/cm}^3)$ 、 $\tau_y = 88 \text{ (kgf/cm}^2)$ 、 $\alpha \cdot K_0 = 125 \text{ (kgf/cm}^2)$ である。引抜き試験では付着長さは $6D$ (D : 補強材直径) である。解析においては引抜き端近傍での付着のみだれを考慮して、引抜き端から $1D$ の範囲の付着力を無視した。図-5 に、自由端すべり量と平均付着応力度の関係を実験結果と解析結果を比較して示す。全ての解析モデルにおいて、自由端すべり量 0.02 cm 以上 の範囲では、各ボンドリンク要素のすべり量はほぼ一様であった。また、実験結果と解析結果はほぼ一致しているので、組紐状ならびに組紐状表面に硅砂を接着させた場合には、このボンドリンク要素モデルを用いて以下の解析を行なうこととした。

繊維補強材を用いた引抜き試験における平均付着応力と端部すべり量の関係は、粒子を補強材表面に接着させた場合の様に、引抜け量が小さい領域で付着応力が増大し、その後ほぼ一定の付着応力を保持する型と、異形加工した場合の様にすべり量と伴に徐々に付着応力が増大してゆく型の 2 つに分けられることが、これまでの実験結果^{1) 2)} からも報告されている。ボンドリンク要素の付着応力 - すべり関係もこの 2 つの型に分類することができるので、ここでは前者を「摩擦すべり型」、後者を「くさび型」と呼ぶこととする。

3. 一軸両引き試験

前節で決定したボンドリンク要素を用いて、一軸両引き試験について解析を行い、既報告³⁾での実験結果と比較した。図-6 に試験方法、また図-7 に解析モデルを示す。解析には、供試体にひびわれが発生していない状態(ステップ 0)、1 本発生した状態(ステップ 1)、3 本発生した状態(ステップ 2)、7 本発生した状態(ステップ 3)についてそれぞれ解析し、各ステップでコンクリートが引張強度に達した時点で次のステップに移行させる方法をとった。なお、各ステップとも、ひびわれ面から $1D$ の範囲の付着応力を無視した。解析に用いたコンクリート要素は、圧縮強度 $260 \text{ (kgf/cm}^2)$ 、引張強度 $19 \text{ (kgf/cm}^2)$ 、ボアソン比 0.16 である。図-8 に実験結果および解析結果の補強材平均ひずみと応力度の関係を示す。補強材 K 64 S を

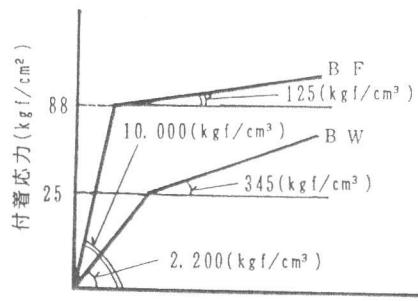


図-4 ボンドリンク要素モデル

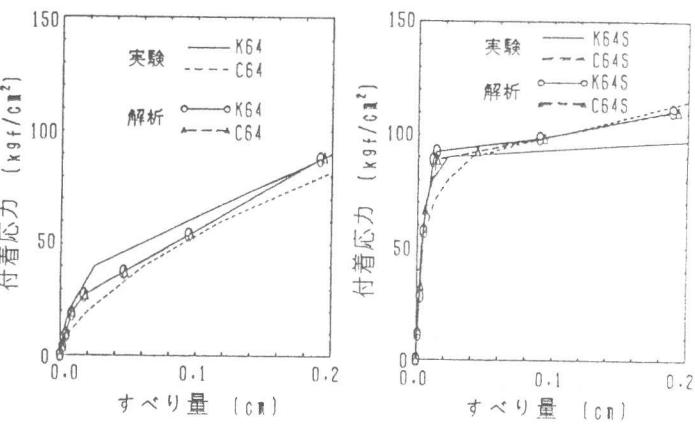


図-5 自由端すべり量と平均付着応力度の関係

表-2 付着応力度一覧

補強材	ボンドリンク	最大付着応力度 (kgf/cm²)	
		棒材応力度 500 kgf/cm^2 時	棒材応力度 $1,500 \text{ kgf/cm}^2$ 時
K 64	くさび型	12.77	25.36
C 64	(BW)	9.63	17.32
K 64S	摩擦滑り型	26.13	54.05
C 64S	(BF)	20.09	34.43

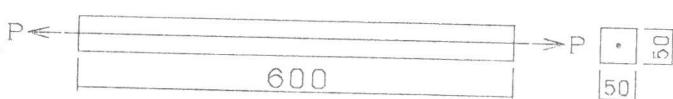


図-6 両引き試験方法

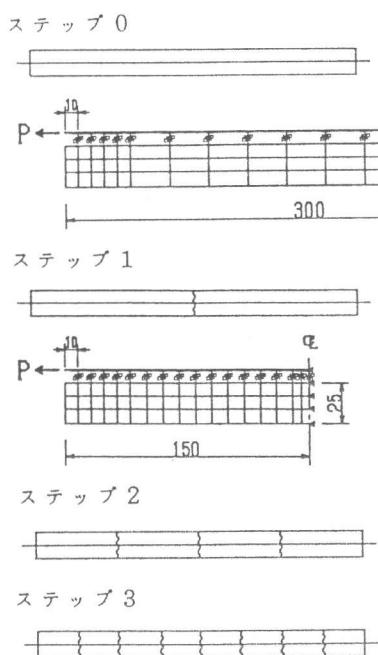


図-7 両引き付着解析モデル

除いて両者はほぼ一致していることがわかる。

補強材K64Sにおいて両者に差異が生じた原因としては、実験でのコンクリート引張強度のバラツキが考えられる。表-2に、補強材応力度500(kgf/cm²)および1,500(kgf/cm²)における最大付着応力度を示す。ここで、「くさび型」のボンドリンク要素(BW)の補強材K64では、補強材応力度1,500(kgf/cm²)時における最大付着応力度が $\tau_y = 25$ (kgf/cm²)よりも若干大きく、第二剛性に入っていることがわかる。他のモデルではすべて τ_y 以下であり、特に「摩擦すべり型」(DF)では、 $\tau_y = 8.8$ (kgf/cm²)に対して、ボンドリンクに生じている付着応力度は、かなり低い値を示している。

4. コンクリートの引張協力効果

4.1 解析パラメーターの設定

繊維補強材は種々弾性係数を持つものが考えられるので、補強材の弾性係数が異なった場合、コンクリートからどの程度の引張協力が得られるかが問題となる。さらにボンドリンクの付着応力-すべり関係については前節での解析結果から、1,500(kgf/cm²)程度の補強材応力度では、「摩擦すべり型」のものは τ_y が60(kgf/cm²)程度であれば第一勾配 K_0 の範囲にあり、「くさび型」のものは τ_y のレベルによっては第二勾配 $\alpha \cdot K_0$ に入るものと考えられる。そこで、パラメータ解析

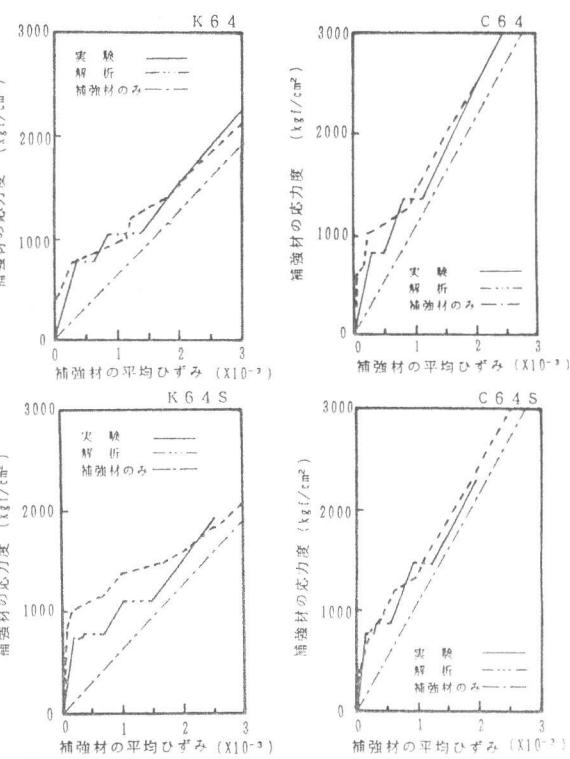


図-8 補強材平均ひずみと応力度の関係

除いて両者はほぼ一致していることがわかる。

表-3 解析パラメータ一覧

MODEL	補強材の種類		ボンドリンク要素				両引き試験 試験体名
	材料	ヤング率 (kgf/cm ²)	TYPE	K ₀ (kgf/cm ²)	τ_y (kgf/cm ²)	$\alpha \cdot K_0$ (kgf/cm ²)	
AF	アラミド	6.4×10^6	摩擦 滑り型	10,000	88	125	K64S
CF	カーボン	1.1×10^6	(BW)				C64S
SF	スチール	2.1×10^6					—
AW1	アラミド	6.4×10^6			0		—
CW1	カーボン	1.1×10^6					—
AW2	アラミド	6.4×10^6	(くさび型 (BW))	2,200	12.5	34.5	—
CW2	カーボン	1.1×10^6					—
AW3	アラミド	6.4×10^6			25		K64
CW3	カーボン	1.1×10^6					C64

により検討を行なうにあたり、表-3に示すような解析パラメータを設定した。すなわち、「摩擦すべり型」を有する同一のボンドリンクを用い、補強材の弾性係数のみを変えた場合と、補強材弾性係数を固定し、「くさび型」の付着応力-すべり関係における τ_y をえた場合を設定した。補強材の弾性係数は、アラミド繊維、炭素繊維、鉄筋の3種類を想定している。ただし、鉄筋のボンドリンク要素には、組紐状表面に硅砂を接着した場合の「摩擦すべり型」のボンドリンクを仮想的に用いている。

4.2 コンクリートの引張協力効果の評価法

図-9に示すように、曲げひびわれ間の補強材の応力度は、ひびわれ位置で最大(σ_{rmax})となるが、付着力によって補強材負担力の一部がコンクリートに伝達されるため、ひびわれ中央で最小(σ_{rmin})となる。六車、森田⁴⁾は(1)式に示すk1k2を用いてコンクリートの引張協力効果を表現できることを示し、k1k2をコンクリート強度ならびに鉄筋の種類(異形鉄筋、丸鋼)にかかわらず(2)式のように補強材の平均ひずみ(ε_{rav})の関数として与えている。

$$k1k2 = \frac{A_r (\sigma_{rmax} - \sigma_{rav})}{A_{ce} \cdot \sigma_{tb}} \quad (1)$$

A_r : 補強材の断面積

A_{ce} : コンクリートの断面積

σ_{tb} : コンクリートの引張強度

σ_{rmax} : ひびわれ位置での補強材応力度

σ_{rav} : 補強材の平均応力度

$$k1k2 = \frac{1.0}{2.2 \times 10^3 \varepsilon_{rav} + 1.1} + 0.22 \quad (2)$$

(1)式の分母分子を A_r で除して補強材応力度に換算すると、 $k1k2$ は図-9中のBB'に対するAA'の比(AA'/BB')を表わしている。コンクリートの引張協力効果を、曲げモーメント曲率関係における曲率減少量として定義する場合⁵⁾もあり、これを軸方向引張応力とひずみの関係に適用すると、図-9中のAA''/BB''となる。異なる弾性係数の補強材に対するコンクリートの引張協力効果を比較する場合には、応力度差による表示では、図-9中のAA'/BB' と(A')(A')/B(B')との比較、ひずみ差による表示では、AA''/BB''と(A'')(A'')/B(B'')との比較となり、表示方法によって異なる評価を与える。

4.3 補強材弹性係数の影響

モデル AF, CF, SFについて、

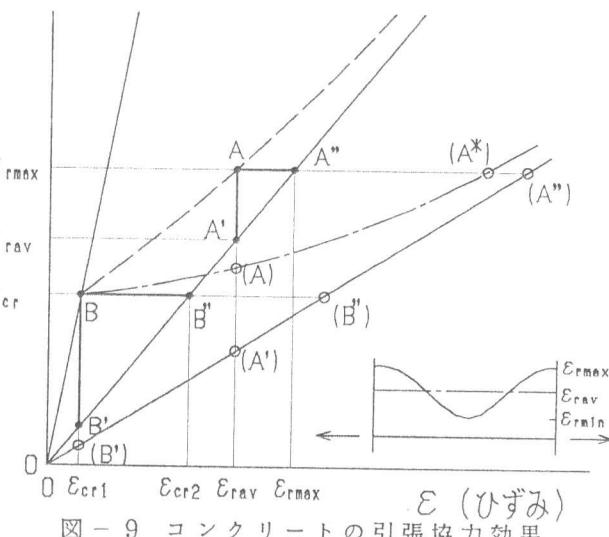


図-9 コンクリートの引張協力効果

k_{1k2} を用いてコンクリートの引張協力の程度を比較する。前述したように弾性係数の異なる補強材では、同一ひずみでの比較と同一応力での比較の双方を行なう必要があると考えられる。図-10a. は補強材の平均ひずみ (ϵ_{rav}) に対する k_{1k2} の値、図-10b. はひびわれ位置での補強材の応力度 (σ_{rmax}) に対する k_{1k2} の値を比較している。 k_{1k2} の値が大きいものほど、コンクリートの引張力負担が大きく、引張協力効果が大きいと判断される。補強材の平均ひずみ (図-10a.) で比較すると、弾性係数の低い補強材の方がコンクリートの引張協力効果が大きい。特に補強材の平均ひずみが小さい範囲 ($\epsilon_{rav} < 1.5 \times 10^{-3}$) でその傾向が顕著である。補強材の応力度 (図-10b.) で比較すると、補強材の弾性係数によるコンクリート引張協力効果の差はあまり見られない。ただし同一ひずみ、同一応力による比較でも、ひびわれ発生本数が異なる場合があるので留意する必要がある。

図-11にモデル A F と S F についてひびわれ位置での補強材応力度 (σ_{rmax}) が 1090 (kgf/cm^2) のときの付着応力および補強材応力の分布の例を示す。この図からわかるように、弾性係数の低い A F では、ひびわれ近傍での付着応力が大きくなり補強材の応力度はひびわれ位置から遠ざかるに従い、すみやかに減少していく。

4.4 付着応力度の影響

表-3 中の AW1～3, CW1～3 に示す「くさび型」の付着応力-すべり関係を持つ場合について、 τ_y の変化が k_{1k2} に及ぼす

影響について解析した。モデル AW1～3 について、図-12a. では、補強材の平均ひずみと k_{1k2} の関係、図-12b. では、ひびわれ位置での補強材応力度と k_{1k2} の関係を示している。図-12c. d. はモデル CW1～3 について同様の比較を行なったものである。図-12a. b. とともに k_{1k2} の全体的な減少傾向は、AW1～3 で同程度であるが、AW3のみは他の2つに比べひびわれ発生時期が遅れている。同様の傾向は図-12c. d. の CW1～3 についても見られる。したがって、本解析の両引き状態を梁材の引張域での状態と考えると、 τ_y が低くなってしまっても梁全体としての曲げ剛性にはあまり変化がないが、ひびわれ間隔には大きく影響するものと考えられる。また AW1 と AW2, CW1 と CW2 を比較すると τ_y の大きさによる k_{1k2} への影響は、補強材の弾性係数が大きい場合ほど顕著になることがわかる。

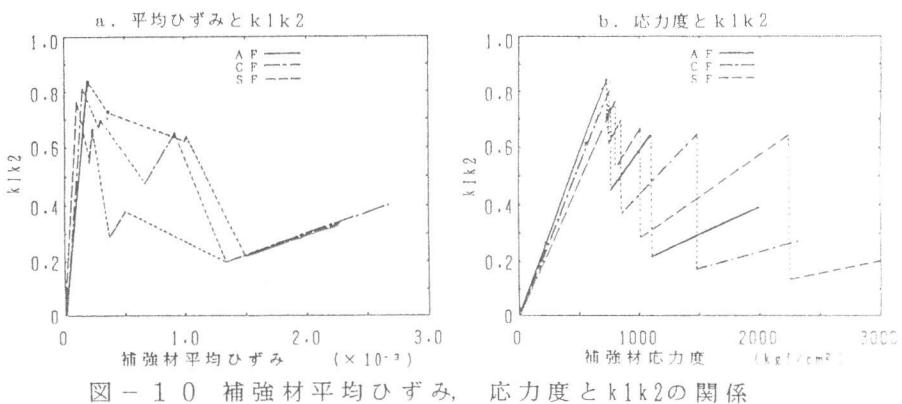


図-10 補強材平均ひずみ、応力度と k_{1k2} の関係

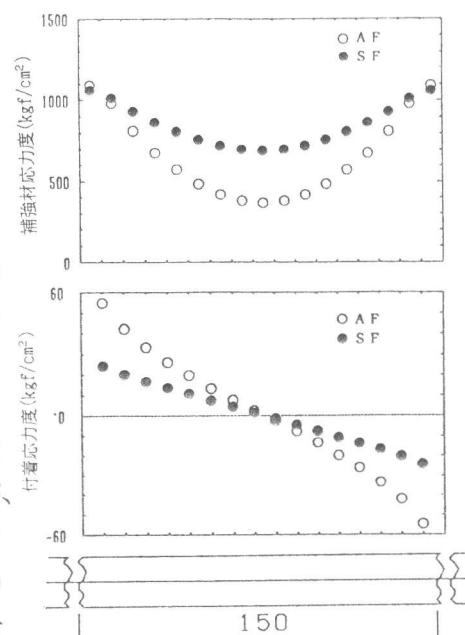
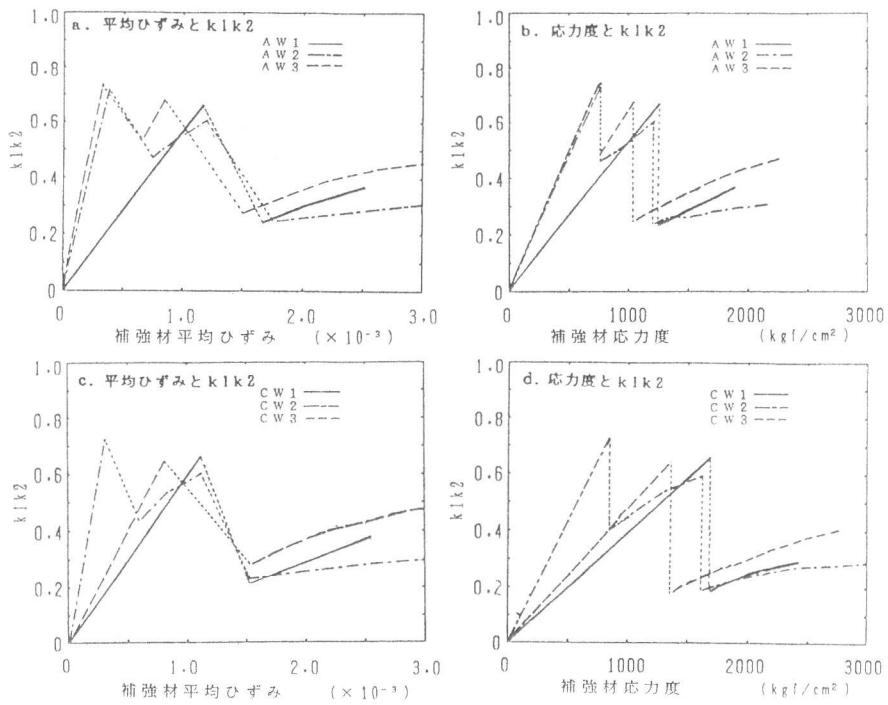


図-11 補強材応力度、付着応力度の分布



5. まとめ

図-12 補強材平均ひずみ、応力度と k_1k_2 の関係

本解析および考察から得られた結果を以下にまとめる。

- 1) 補強材応力度が $1,500 \text{ kgf/cm}^2$ 程度以下の範囲では、付着応力 - すべり関係の第一折れ点の付着応力度 τ_y が 60 kgf/cm^2 程度であれば、ボンドリンク要素は弾性域にある。部材としての非線形性は、むしろひびわれの発生によって生じる。
- 2) コンクリートの引張協力効果 (k_1k_2) を同一の補強材平均ひずみで比較すると、補強材の弾性係数が高いものほど、コンクリートの引張協力効果が低下する。同一の補強材応力度で比較した場合には、補強材の弾性係数がコンクリートの引張協力効果に及ぼす影響は少ない。
- 3) τ_y が低下することによるコンクリートの引張協力効果減少への影響は、補強材の弾性係数が高いものほど大きい。
- 4) 補強材の弾性係数が同じであれば τ_y の影響は、部材全体としての剛性に対してよりも、ひびわれ間隔に対して顕著に表われる。

<参考文献>

- 1) 松原、岡本、遠藤、谷垣：アラミド繊維による組紐状棒材の研究（その3. 付着性状 引抜き試験結果），日本建築学会大会学術講演梗概集C, pp 829-830, 昭和63年
- 2) 丸山、伊東、西山：異形加工したFRPロッドの付着特性，コンクリート工学年次論文報告集，第11巻，第1号，pp 777-882, 1989
- 3) 蓮尾、岡本、谷垣：アラミド繊維による組紐状棒材の研究（その12. 付着性状 両引き付着試験結果），日本建築学会大会学術講演梗概集C, pp 991-992, 1990
- 4) 六車、森田：鋼とコンクリートの付着に関する基礎的研究（鉄筋コンクリート引張材の変形について）：日本建築学会論文報告集，第134号，pp 1-8, 昭和42年4月
- 5) C E B - F I P M o d e l C o d e 1990
- 6) 森田、藤井：有限要素法解析における付着モデルの現状と今後の課題，日本コンクリート工学会RC構造の有限要素解析に関するコロキウム論文集, pp 35-42, 1984
- 7) 佐藤、青柳、内田：付着に基づいたRC曲げ部材の変形解析理論の定式化について，土木学会第34回年次学術講演会講演概要集，第5部, pp 317-318, 昭和54年10月