

コンクリートと連続繊維補強材間の 付着挙動に関する数値解析的アプローチ

松尾真紀¹・二羽淳一郎²・児島孝之³

¹正会員 工修 東京工業大学助手 大学院理工学研究科土木工学専攻
(〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

²フェロー会員 工博 東京工業大学教授 大学院理工学研究科土木工学専攻
(〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

³正会員 工博 立命館大学教授 理工学部土木工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

コンクリートと補強材間の付着伝達機構を表現するために、2次元有限要素モデルを提案した。本付着モデルは、コンクリート要素と補強材要素の界面に接触する2つの曲線からなる2次元アイソパラメトリック線要素で表現される。これは、既報の論文²⁰⁾中で定義したひび割れモデルを拡張したものである。

そして、付着引抜き試験の2次元有限要素解析を行い、本論文で提案する付着モデルのコンクリートと連続繊維補強材間の付着応力-すべり関係を同定した。実験結果^{21), 22)}と解析結果との比較を行うことによって、各連続繊維補強材(より線状炭素繊維補強材および組紐状アラミド繊維補強材)の付着応力伝達機構の相違を明らかにすることができた。

Key Words : bond, interfacial bond element, finite element analysis, fiber reinforced plastic

1. はじめに

コンクリートは、圧縮強度に対して引張強度がその約10分の1と非常に小さい。そのため、コンクリート構造物では、引張応力の作用する部位に高い引張強度を有する鉄筋を配置し、鉄筋コンクリート(Reinforced Concrete)として用いられるのが通常である。また、コンクリートの優れた圧縮強度をさらに有効に活用したプレストレストコンクリート構造も、橋梁の長大化が図られる今日、ますます発展を遂げている。最近では、コンクリート構造と鋼構造の長所を併せ持つ複合構造形式が注目を浴びており、国内でもいくつかの施工例がある。このように、コンクリート構造は無補強で用いられるよりも、鉄筋等で補強されて用いられる場合がほとんどである。

つまり、コンクリート構造は、コンクリートと鉄筋が一体となって外力に抵抗する複合体であると言える。この複合体としての機能を十分に発揮するためには、コンクリートとその内部に配置された鉄筋が互いに追随しあって挙動することが不可欠である。そして、その一体化の基本をなすのがコンクリートと鉄筋間に生じる付着作用である。この付着作用を

明確にするということは、コンクリート構造の全体挙動を把握する上で非常に重要であると言える。

一般に、コンクリートと鉄筋間に良好な付着性状を有する部材では、テンションスティフニング(Tension Stiffening)効果が働き、引張領域の剛性が向上する。しかし、コンクリートと鉄筋の相対変形が局所的に大きくなる場合、例えば、柱-はり接合部や柱-フーチング接合部などでは、コンクリートに定着されている鉄筋の抜け出しによって、ひび割れが拡大し、大きな変形が生じる。また、付着界面そのものが弱点となり、鉄筋に沿ったひび割れが発生し、かぶりコンクリートが剥離する付着割裂破壊を生じる部材もある。このように、付着作用はコンクリート構造の挙動や破壊形態に大きく影響を及ぼすものであるため、部材の変形性状を精度良く把握するためにはコンクリートと鉄筋間の付着を考慮する必要がある。

引張強度が高く、耐食性に優れ、非常に軽いという特性を持つ連続繊維補強材をコンクリート分野で利用するため、これまでも多くの研究がなされてきた。最近では、連続繊維補強材をコンクリート構造物の補修・補強に適用するための指針¹⁾なども刊

行され、従来の鉄筋の代替として連続繊維補強材を使用する機会がこれからもますます増えていくものと考えられる。

本論文では、コンクリートと補強材(本研究では連続繊維補強材を対象としているため、鉄筋も含めて補強材と記す)間の付着応力伝達機構を表現することのできる2次元有限要素モデルを提案する。そして、連続繊維補強材(より線状炭素繊維補強材および組紐状アラミド繊維補強材)の付着引抜き試験について2次元有限要素解析を行い、それぞれの連続繊維補強材の付着応力-すべり関係を同定する。ここでは、付着引抜き試験結果^{21), 22)}と解析結果との比較を行い、各連続繊維補強材とコンクリート間の付着応力伝達機構の違いを明確にする。

2. 研究背景

(1) コンクリートと鉄筋間の付着性状

コンクリートと鉄筋間の付着作用は、コンクリート構造が外力に対して有効に抵抗するために不可欠なものである。この付着作用は、コンクリートと鉄筋間の①界面の粘着力、②界面のすべりに対する摩擦抵抗、③界面の凹凸によるかみ合わせ作用からなると考えられている。表面形状に変化を持たせた鉄筋(異形鉄筋等)は、特に③に挙げた機械的な抵抗力を高めたものと言える。

コンクリートと鉄筋間の付着性状を把握するための実験的な研究は、50年ほど前から行われている。水野・渡辺²⁾は、Mains³⁾の考案した試験法に改良を加え、ひずみゲージを内部に埋め込んだ鉄筋を用いた付着試験を行っている。この実験で測定された鉄筋のひずみ分布から、鉄筋に沿った付着応力分布を算出し、①平均付着応力度の考え方は妥当ではない、②異形鉄筋はふしの効果により、モーメントを速やかにコンクリートに伝達することができるという結論を得た。また、六車ら^{4), 5), 6), 7)}は引抜き試験と両引き試験を行い、①異形鉄筋では、任意位置での付着応力をその位置でのすべりの関数として表示することができる、②付着両引き試験において、付着応力分布、ひび割れの発達機構、ひび割れ間コンクリートの引張負担を理論的に示すことができる、③引抜き試験と両引き試験のどちらの試験法でも付着性状を十分に評価することができる、④荷重端部の応力分布の乱れは、異形鉄筋では内部ひび割れの発生、丸鋼では鉄筋引張力の増大による鉄筋断面の縮小によって起こるもので、この現象を理論的に取り扱うことは困難であるということを示した。池田⁸⁾は、

①力学的に鉄筋コンクリートのひび割れ間隔の下限值が存在する、②鉄筋端部の定着については、端部の応力伝達の影響も含めた部材全体としての検討が必要であると報告している。さらに、大型はりの実験を実施したFerguson and Thompson⁹⁾は、多数の実験結果から、付着応力の伝達長、鉄筋のかぶり、コンクリート強度、せん断補強筋量、ひび割れ発生状況などについて検討し、①鉄筋のかぶりの効果および②鉄筋の定着長について、さらに研究を進める必要があることを示唆している。

コンクリートと異形鉄筋間の付着性状を表す構成則である付着応力-すべり関係を求めるために、鉄筋の種類、かぶり厚、コンクリート強度を変化させた付着両引き試験を行ったMirza and Houde¹⁰⁾は、実験後の供試体を軸方向に切断し、コンクリートと鉄筋の界面の観察を行った。その結果、鉄筋のすべりによってふし周辺のコンクリートが粉々に破壊したり、削られたりする様子は観察されなかった。したがって、鉄筋周辺のコンクリートにくしのような微細ひび割れが多数発生し、それによってコンクリートと鉄筋の間に相対変形が生じたと説明している。これと同様の結果が、Broms¹¹⁾やGoto¹²⁾によっても報告されている。

コンクリートと鉄筋(あるいはそれに代わる補強材)間の付着性状を把握することは、コンクリート構造物の破壊までの挙動を正確に知る上で重要である。先に述べたように、これまでの研究から、付着に関わる様々な現象が実験的に明らかにされてきている。しかし、付着性状に影響を及ぼす要因が多様で複雑なため、実験のみで付着性状を明らかにするのは困難であると考えられる。したがって、これまで実験的に確認されてきた現象を解析的に追究し、付着性状を考慮した解析手法を確立していくことは、今後、コンクリート構造の破壊現象の解明において重要な役割を果たすと考えられる。

(2) 連続繊維補強材のコンクリート構造への適用

ガラス繊維、炭素繊維、アラミド繊維、ビニロン繊維などの連続繊維補強材を土木分野に適用するための研究は、現在も盛んに進められている。これらの連続繊維補強材を鉄筋の代替品として適用しようとするとき、①軽量で取り扱いが容易である、②高強度である、③耐食性が優れている、④複雑な形状のものも自由に成形できるということが利点として挙げられる¹³⁾。

現在、土木構造物の維持・管理が非常に重要視されており、耐食性に優れた連続繊維補強材のコンクリート構造への適用がますます期待されている。特

に、連続繊維補強材は PC 鋼材と同程度の引張強度を有することから、プレストレストコンクリート用緊張材としての利用が注目され、そのための研究も行われている。連続繊維補強材をプレテンション方式の緊張材として適用するため、プレストレス導入に必要な伝達長に関して研究を行ったもの¹⁴⁾や部分的に付着をなくした、新たな構造形式を提案する研究¹⁵⁾など、従来の鋼材とは異なった連続繊維補強材の性質を有効に活用しようという動きも見られる。

(3) コンクリート構造の有限要素解析

「鉄筋コンクリートの有限要素解析に関する研究の現状」と題された ASCE の委員会報告¹⁶⁾では、以下のことが報告されている。

コンクリート構造物内で見られる材料非線形性としては、①コンクリートに生じるひび割れ、②ひび割れに伴う骨材のかみ合わせ作用、③コンクリートと鉄筋の間の付着作用、④ひび割れ部分に配筋されている鉄筋のダウエル作用、⑤クリープ、収縮、温度および荷重履歴のような時間依存性の影響が挙げられる。このような性質を持つコンクリート構造物の有限要素解析を行う場合、①コンクリートと鉄筋の力学的特性が異なる、②鉄筋は一軸、コンクリートは多軸応力状態である、③ひび割れの発生に伴い、構造物内の応力あるいはひずみ分布が連続的に変化する、④付着応力-すべり関係が非線形である、⑤コンクリートの材料特性は時間に依存し、変形は荷重履歴と同様にクリープおよび収縮に影響される、⑥ひび割れ界面での力の伝達機構を解析モデルに組み込むのが難しいといった様々な問題が生じる。

以上のように ASCE の委員会報告では、コンクリートと鉄筋間の付着作用の把握が問題点の一つとして挙げられている。

鉄筋コンクリートはりの解析に有限要素法を初めて適用した Ngo and Scordelis¹⁷⁾は、コンクリートと鉄筋間の付着作用を表現するために、コンクリート要素と鉄筋要素の節点をバネでつなぐリンク要素を提案し、コンクリートと鉄筋との間の相対変形を考慮した。Ngo らは、線形リンク要素を用いて、ひび割れ発生と付着作用が鉄筋コンクリートはりに及ぼす影響について検討を行っている。一方、Nilson¹⁸⁾は Ngo らが考案したリンク要素に非線形な局所付着応力-局所すべり関係を導入し、鉄筋コンクリートの有限要素解析を行っている。最近では、Monti and Spacone¹⁹⁾が付着応力-すべり関係を考慮したはり要素を用い、柱の動的解析を実施している。しかし、Ngo らや Nilson の研究以後、コンクリートと鉄筋間の付着作用に着目し、例えば有限要素解析において

離散的な付着モデル(リンク要素や本研究で提案する接触要素のようなモデル等)を用い、局所的な付着作用がコンクリート構造物全体の挙動に与える影響について、詳細に検討した研究はあまり行われていないように思われる。また、これまでの付着に関する研究は、実験に基づいた破壊基準や構成則に関するものがほとんどである。このような背景から、コンクリートと補強材間の界面で生じる局所挙動を表現することのできる付着要素を用いたコンクリート構造の有限要素解析を行うことは、付着応力伝達機構を明確に把握する上で非常に役立つものと考えられる。また、付着応力伝達機構が明らかになれば、コンクリート構造物全体の破壊メカニズムの理論的裏付けにも役立つものと考えられる。

3. 付着要素の提案

(1) 付着要素モデルの定式化

補強材(本研究では、連続繊維補強材を主たる対象としているが、以下、鉄筋も含めて補強材と記すことにする)の両端に引張力が作用したときの、その周辺のコンクリートと補強材の変形を図-1^{10), 11), 12)}に示す。このとき、補強材の伸びに対してコンクリートが追随しようとする作用が働く。ある一定値まではコンクリートも補強材と一緒に伸びるが、その値を超えると、補強材の周りのコンクリートに微細ひび割れ(内部ひび割れ)が発生し、コンクリートと補強材の間に変位差が生じる。また、コンクリート表面にまで至るひび割れ(主ひび割れ)が発生した場合には、さらに大きな変位差が生じることになる。このように補強材とコンクリートの間に変位差が生じると、両者の界面に表面力が作用し、補強材表面を

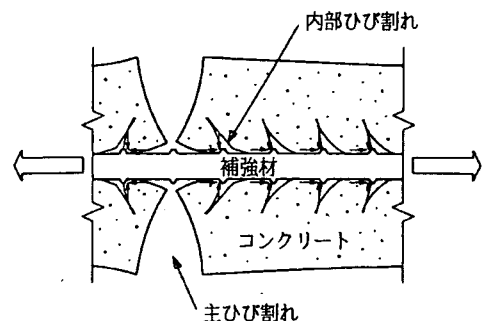


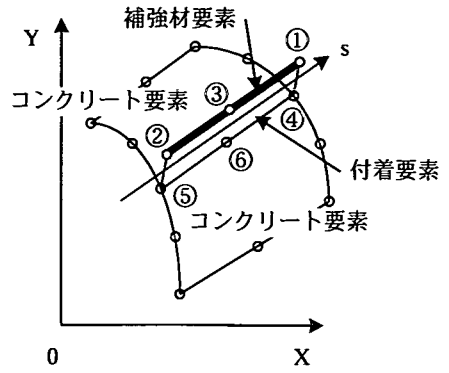
図-1 コンクリートと補強材の変形

通じて相互に力の伝達が行われる。これが付着作用であり、表面力の主体を成すのは一般に補強材表面に沿って作用する補強材軸方向のせん断応力成分と、補強材表面に対して垂直方向に作用する直応力成分である。ここで、前者を付着応力と呼ぶことにする。また、本研究では①引抜きおよび両引き付着試験のように補強材の軸方向のみに応力が作用する場合を想定していること、②直応力成分に関する既往の実験データがないことから、付着応力のみに着目して、以後の議論を進めていくことにする。

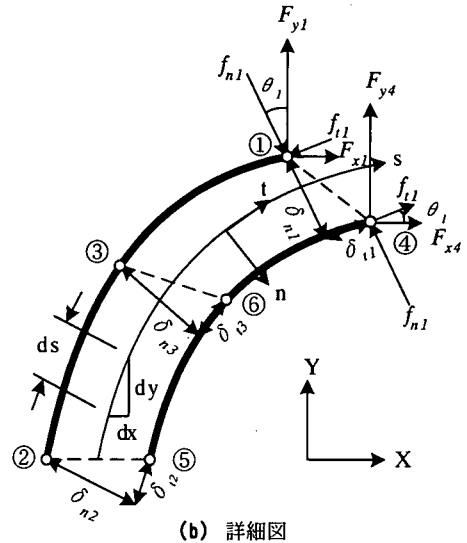
前述したようにコンクリートと補強材の付着作用の構成成分は4成分ある。しかし、実験的に付着作用を明らかにするのも未だ困難な段階にある。このようなことを考慮すると、付着モデルは簡易かつ高精度であることが望ましいと考えられる。そこで本研究では、コンクリートと補強材間の付着作用を、2つの曲線からなり6節点を有する2次アイソパラメトリック線要素で表現することにする。本要素は2次の接触要素であることから、1要素内で非線形な応力分布を表現することができる。本研究ではこの接触要素を適用することにした。ここで提案する付着要素は、既報の論文²⁰⁾でひび割れ要素として提案した有限要素と同様に定義することができる。なぜなら、ひび割れ要素はコンクリートとコンクリートの界面、付着要素はコンクリートと補強材の界面というように、どちらも界面で生じる局所的な挙動を表現する要素であるという点で一致しているからである。そして、どちらの要素も界面を含む要素(コンクリート要素とコンクリート要素、あるいはコンクリート要素と補強材要素)間で生じる相対変位と、その変位に相当する伝達応力の関係を要素特性として組み込むことができるからである。

付着要素の概念図を図-2(a)に示す。付着要素の①～⑥までの6つの節点のうち、曲線①-③-②は補強材要素と、曲線④-⑥-⑤はコンクリート要素と、それぞれ節点を共有している。また、付着要素は初期段階、つまりコンクリート要素と補強材要素の間に相対変位が生じるまでの段階では、節点①と④、②と⑤、③と⑥が、それぞれ空間内の同一の座標位置を占めている。そして、外力の作用によりコンクリート要素と補強材要素の間に相対変位が生じると、その界面に表面力が発生する。その現象を表現するのが付着要素であり、付着要素そのものに体積はない。

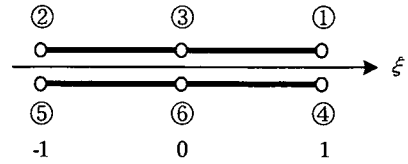
まず、付着要素を表す2つの曲線の相対変位を2次元で表すため、付着要素の中心線に対して接線方向をt、垂直方向をnとしたt-n座標系を考える。そして、接線方向の相対変位(すべり)を δ_t 、付着応



(a) 全体座標系



(b) 詳細図



(c) 局所座標系

図-2 付着要素モデル

力を τ_t 、また垂直方向の相対変形を δ_n 、応力を σ_n とすると、一般に次のような関係式が得られる。

$$\{\sigma\} = \begin{Bmatrix} \sigma_n \\ \tau_t \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{nn} & B_{nt} \\ B_{tn} & B_{tt} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_n \\ \delta_t \end{Bmatrix} = [B_b] \{\delta\} \quad (1)$$

ここで、応力ベクトル $\{\sigma\}$ は付着要素の任意点での応力である。

次に、付着要素に沿った座標系を s 座標系とし、1次元の座標系について考える。付着要素の詳細図を図-2(b)に示す。先に述べたように、初めコンクリート要素と補強材要素は節点をそれぞれ共有しており、その間に相対変位が生じると s 座標系の両側に変位する。したがって、付着要素の任意点での変位 $\{\delta\}$ と相対節点変位 $\{\delta_e\}$ の間には以下の関係式が成立する。

$$\{\delta\} = \begin{Bmatrix} \delta_n \\ \delta_t \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 \end{bmatrix} \{\delta_e\} = [B] \{\delta_e\} \quad (2)$$

$$\{\delta_e\} = [\delta_{n1} \quad \delta_{t1} \quad \delta_{n2} \quad \delta_{t2} \quad \delta_{n3} \quad \delta_{t3}]^T \quad (3)$$

$$N_1 = \frac{1}{2}\xi(1+\xi), N_2 = -\frac{1}{2}\xi(1-\xi), N_3 = 1-\xi^2 \quad (4)$$

ここで、 N_i は形状関数であり、図-2(c)に示す正規化された局所座標系で定義されるものである。また、相対節点変位 $\{\delta_e\}$ は、式(3)に示すように、もともとは空間内の同一の座標位置を占めていた節点間に生じた相対変位である。

付着要素に仮想変位 $d\{\delta_e\}$ を与えた場合、要素に対する外力による仕事と内力による仕事は次式で表される。

$$\text{外力による仕事} = d\{\delta_e\}^T \cdot \{f_e\} \quad (5)$$

$$\text{内力による仕事} = \int_A d\{\delta\}^T \cdot \{\sigma\} d(\text{Area}) \quad (6)$$

ここで、 $\{f_e\}$ は相対節点力である。つまり、付着要素は、もともと空間内の同一の座標位置を占めていた節点①と④、②と⑤、③と⑥の間に相対的なズレが生じることによって定義されるものである。したがって、2次元場での付着要素の変位 $\{\delta_e\}$ と節点力 $\{f_e\}$ は、1行×6列=6つの係数で表される。

仮想仕事の原理から、外力による仕事と内力による仕事は等しくなる。これが、任意の変位 $d\{\delta_e\}$ に対して成立するためには、

$$\begin{aligned} d\{\delta_e\}^T \cdot \{f_e\} &= \int_A d\{\delta\}^T \cdot \{\sigma\} d(\text{Area}) \\ &= d\{d_e\}^T \int_A [B]^T [B_b] [B] \{d_e\} d(\text{Area}) \\ &= d\{d_e\}^T \int_s [B]^T [B_b] [B] \cdot u_s \cdot ds \cdot \{d_e\} \end{aligned}$$

$$\therefore \{f_e\} = \int_s [B]^T [B_b] [B] \cdot u_s \cdot ds \cdot \{\delta_e\} = [K_b] \{\delta_e\} \quad (7)$$

ここで、 u_s は補強材の周長である。以上より、付着要素の剛性マトリクス $[K_b]$ は次式のように求められる。

$$\begin{aligned} [K_b] &= \int_s [B]^T [B_b] [B] \cdot u_s \cdot ds \\ &= \int_{-1}^1 [B]^T [B_b] [B] \cdot u_s \cdot \sqrt{(dx/d\xi)^2 + (dy/d\xi)^2} \cdot d\xi \quad (8) \end{aligned}$$

式(8)は付着要素に沿う $t-n$ 座標系による表示のため、これを全体座標系($x-y$ 座標系)に変換する必要がある。まず、節点①と④、②と⑤、③と⑥における t 軸と x 軸のなす角度をそれぞれ θ_1 、 θ_2 、 θ_3 とし、 $t-n$ 座標系における相対節点力 $\{f_e\}$ を $x-y$ 座標系の節点力 $\{F_e\}$ に変換する。

$$\{F_e\} = \begin{Bmatrix} F_{x1} \\ F_{y1} \\ F_{x2} \\ F_{y2} \\ F_{x3} \\ F_{y3} \\ F_{x4} \\ F_{y4} \\ F_{x5} \\ F_{y5} \\ F_{x6} \\ F_{y6} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} -s_1 & c_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ c_1 & s_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -s_2 & c_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_2 & s_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -s_3 & c_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_3 & s_3 \\ s_1 & -c_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -c_1 & -s_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & s_2 & -c_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -c_2 & -s_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_3 & -c_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -c_3 & -s_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} f_{n1} \\ f_{t1} \\ f_{n2} \\ f_{t2} \\ f_{n3} \\ f_{t3} \end{Bmatrix} = [\lambda] \{f_e\} \quad (9)$$

ここでは、 $\sin \theta_i = s_i$ 、 $\cos \theta_i = c_i$ と表示している。

次に、同様の方法で、 $t-n$ 座標系の相対節点変位 $\{\delta_e\}$ を、 $x-y$ 座標系の節点変位 $\{u_e\}$ に変換する。

$$\{u_e\} = [\lambda] \{\delta_e\} \quad (10)$$

$$\{u_e\} = [u_{x1} \quad u_{y1} \quad \cdots \quad u_{x6} \quad u_{y6}]^T \quad (11)$$

式(9)、(10)を式(7)に代入すると、 $x-y$ 座標系で表された付着要素の剛性マトリクス $[K]$ が得られる。

$$[\lambda]^T \{F_e\} = [K_b] \cdot [\lambda]^T \{u_e\}$$

$$\{F_e\} = [\lambda] [K_b] [\lambda]^T \{u_e\}$$

$$[K] = [\lambda][K_b][\lambda^T] \quad (12)$$

ここで、 $[\lambda][\lambda^T] = [I]$ 、 $[\lambda^T][\lambda] = 2[I]$ 、 $[I]$ は単位行列である。

(2) 付着要素特性

付着要素特性を表す $[B_b]$ マトリクスは、式(1)に示すように2行×2列=4つの係数から成り立っている。ただし、3(1)節で述べたように、本研究では補強材表面に作用するせん断力のみに着目しており、コンクリートと補強材間の非線形的な付着作用を B_{ii} 値のみで表現することにした。そして、その他の係数には表-1に示す値を与えることにした。ここでは、相対変位と同じ方向のみに応力が伝達されるものと仮定し、 B_{nn} 値と B_{nn} 値は $0(N/mm^3)$ とした。また、 B_{nn} 値にはすべりに影響を与えない程度の小さな値を与えた。この値は、 B_{nn} 値を様々に変化させた解析の結果から、付着引抜き試験²¹⁾、²²⁾の実験結果(①コンクリート表面に達する主ひび割れは発生しない、②補強材の抜け出しにより終局に至る)を満足するように決定したものである。

B_{ii} 値に導入する付着応力(τ_i)—すべり(δ_i)関係の概念図を図-3に示す。付着応力—すべり関係は、付着応力が $0(N/mm^2)$ から最大付着応力までと、最大付着応力以後の2つの曲線で表現した。それぞれの曲線は、以下の式で表される。

$$\tau_i = \tau_0 \left[1 - \left(1 - \frac{\delta_i}{\delta_y} \right)^a \right] \quad (0 \leq \delta_i \leq \delta_y) \quad (13)$$

$$\tau_i = \tau_0 \left(\frac{\delta_u - \delta_i}{\delta_u - \delta_y} \right)^b \quad (\delta_y \leq \delta_i \leq \delta_u) \quad (14)$$

ここで、 $\tau_0(N/mm^2)$ は最大付着応力、 $\delta_y(mm)$ は最大付着応力が生じるときのすべり、 $\delta_u(mm)$ は最大すべりである。 a 、 b は任意の定数であり、付着伝達機構の違いにより変化する。また、ここに示す付着応力—すべり関係は補強材のすべての位置で一義的に定められると仮定する。

まず、付着要素の基本的特性を把握するために、図-4に示す付着両引き試験の有限要素解析を行った。解析は①付着要素なし(完全付着)、②付着要素ありの2ケースについて行った。ここで、ケース①については補強材要素とコンクリート要素の節点を共有させることによって完全付着の状態を表現した。また、コンクリートは2次の4辺形要素、補強材は

表-1 $[B_b]$ マトリクスの係数

B_{nn}	B_{ni}	B_{in}
1.0×10^3	0	0

(単位: N/mm^3)

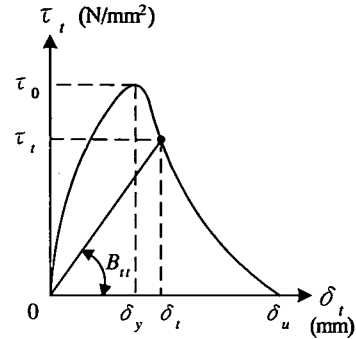


図-3 付着応力—すべり関係

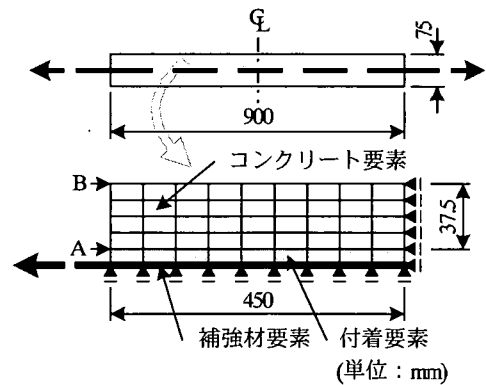
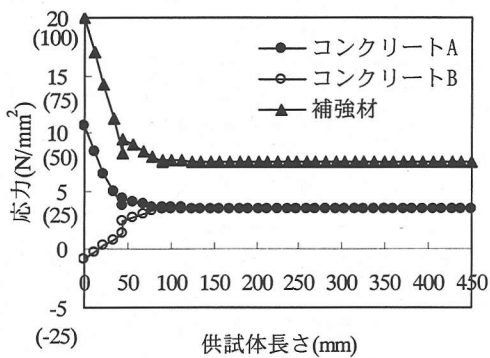


図-4 付着両引き試験

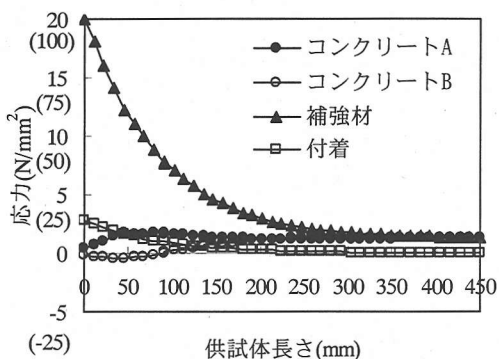
2次の線要素で表現した。

図-5(a)、(b)に、コンクリートにひび割れが発生する前のある荷重段階でのコンクリート、補強材、付着要素の応力分布を示す。図の横軸は荷重端側からの距離、縦軸は各要素の応力を表し、補強筋全域が付着部である。ただし、()内の数値は補強材要素の応力である。また、ここで示す応力とは、コンクリート要素については補強材と接触している部分(A部; ●印)と最外縁(B部; ○印)の軸方向の応力、補強材要素については軸方向の応力、付着要素についてはせん断応力を表している。

完全付着の場合、荷重端近傍の比較的狭い範囲内でコンクリート要素と補強材要素の応力分布が変化し、それ以外の部分では応力が一定となった。一方、付着要素を挿入すると、完全付着としたときよりも



(a) ケース①(付着要素なし)



(b) ケース②(付着要素あり)

図-5 応力分布(付着両引き試験)

広い範囲でコンクリート要素と補強材要素の応力が変化する結果となった。これは、付着要素の有無によって、応力が変化しない定常状態の部分の範囲(伝達長)が変化することを意味している。伝達長はひび割れ分散性に影響を与える要因であることから、付着要素はひび割れ発生状況を把握する上で重要な役割を果たすものと考えられる。

次に、荷重端近傍に着目すると、コンクリート要素や補強材要素に生じる応力が定常状態となっている部分に比べて、付着要素の応力が急激に増大していることから、荷重端近傍ではコンクリートと補強材の間にすべりが生じていることがわかる。また、付着要素を導入することによって、コンクリート要素の応力(A部)が完全付着の場合よりも減少しており、これはすべりが生じることによって補強材からコンクリートに伝達される応力が解放されたものと考えられる。このように応力が大きく変化する部分は、コンクリート構造物内の①ひび割れの発生部分、

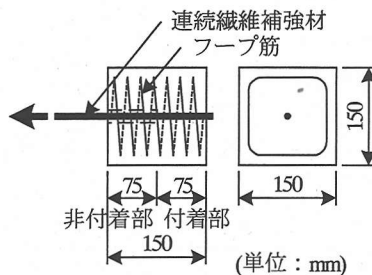


図-6 供試体概要(付着引抜き試験)



図-7 付着引抜き試験

②補強材の定着部分、③集中荷重が作用する部分(支点および載荷点)などが当てはまり、構造全体に破壊をもたらす要因となる場合が多い。しかし、解析上で付着を考慮すれば、応力急変部分をより実現象に近い状態で捉えることができると考えられる。

以上から、有限要素解析で、コンクリートと補強材間の相対変位を許容するという事は、コンクリート構造物の破壊メカニズムを正しく評価する上で重要であることがあらためて確認された。

4. 付着要素を用いた有限要素解析

(1) 解析概要

付着引抜き試験を対象として、本論文で提案した付着要素を用いた2次元有限要素解析を行う。そし

表-2 コンクリートの材料特性

f'_c (N/mm^2)	f_t (N/mm^2)	E_c (N/mm^2)	ν
30	3	3.0×10^4	0.167

表-3 連続繊維補強材の材料特性

	f_u (N/mm^2)	E_s (N/mm^2)	A_s (mm^2)	μ_s (mm)
炭素 繊維補強材	2140	139000	76.0	30.9
アラミド 繊維補強材	1430	67900	89.7	33.6

て、解析結果と実験結果との比較検討を行い、コンクリートと連続繊維補強材間の付着応力-すべり関係を同定することを試みる。

図-6 に実験^{21), 22)}を行った供試体概要を示す。供試体は $150 \times 150 \times 150$ (mm)の立方体である。連続繊維補強材を供試体断面中央に配置し、自由端側 75(mm)を付着部、荷重端側 75(mm)を非付着部とした。また、コンクリートの割裂を防止するためにフープ状の組紐状アラミド繊維補強材(呼び径: 3(mm))を 30(mm)ピッチでらせん状に配置した。実験は荷重制御で、非付着部側の補強材を引き抜くことにより行い、付着部側(自由端)のすべりをダイヤルゲージで測定した。

図-7 に、解析モデルの要素分割と拘束条件、載荷条件を示す。解析は、供試体の対称性から 1/2 のモデルについて行った。また、要素分割数は、①計算時間短縮のため、できる限り少なくする、②解析モデル内部の応力分布が滑らかに変化する、の条件を満足するように、 5×10 分割に決定した。コンクリート要素と補強材要素の間には付着要素が配置されており、コンクリート要素には 8 節点を有する 2 次アイソパラメトリック 4 辺形要素、補強材要素には 3 節点を有する 2 次アイソパラメトリック線要素を用いた。ここで、非付着部における付着要素の B_u 値には 1.0×10^3 (N/mm^3)を代入し、付着応力に影響を及ぼさないように配慮した。なお、解析では、コンクリートの割裂防止のために配置されているフープ状の組紐状アラミド繊維補強材を考慮していない。

表-2、表-3 にコンクリート、補強材(より線状炭素繊維補強材および組紐状アラミド繊維補強材)の材料特性を示す。ここでは、コンクリートは一般的な値、補強材は実験値を示している。本解析では、コンクリートと補強材間の付着作用のみに 3 (2)節

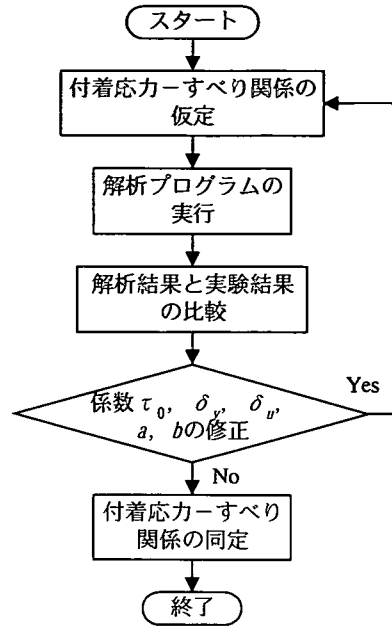


図-8 付着要素の定式化のフロー

で述べた非線形特性を導入し、コンクリート要素と補強材要素は線形弾性体であると仮定した。したがって、表-2、表-3 に示すコンクリートと補強材の強度は、解析結果には無関係である。

(2) 解析方法

a) 解析フロー

図-8 に付着要素を定式化するまでのフローについて示す。これは、付着応力-すべり関係を同定するまでの全体的な解析の流れであり、その概要を以下に示す。

- ① 付着応力-すべり関係を仮定する(式(13)および式(14))。式中の最大付着応力 τ_0 (N/mm^2)、最大付着応力が生じるときのすべり δ_v (mm)、最大すべり δ_u (mm)、定数 a, b 、すべてに任意の値を代入する。
- ② 解析プログラムを実行し、荷重-すべり関係を得る。
- ③ 解析結果と実験結果を比較し、仮定した付着応力-すべり関係の妥当性を判断する。
- ④ ①から③のステップを繰り返し、付着応力-すべり関係を同定する。

次に、解析プログラムのフローを図-9 に示す。その概要は以下のとおりである。

- ① コンクリート、補強材、付着要素、すべての要素を線形弾性体と仮定し、荷重端に任意の強制

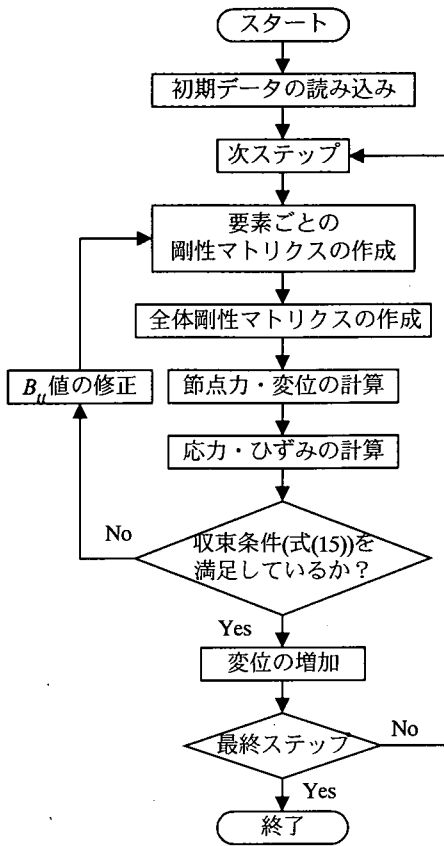


図-9 解析プログラムのフロー

変位を与え、弾性計算を行う。このとき、付着要素の B_u 値には任意の定数を与える。

- ② 求められた付着要素の応力 τ_{ii} (N/mm^2) とすべり δ_{ii} (mm) の関係が、先に仮定した付着応力-すべり関係(図-3)に一致するように、収束計算を行う。このとき、図-3 に示すように $B_{ii} = \tau_{ii} / \delta_{ii}$ で表されることから、求められたすべり δ_{ii} を式(13)または式(14)に代入して新たな B_{ii} 値(= B_{ii1})を求め、付着要素の剛性マトリクスを修正する。
- ③ 載荷荷重が式(15)の収束条件を満足するまで、収束計算を繰り返す。
- ④ 収束条件を満足すれば、強制変位を増加させ、②~④のステップを繰り返す。

$$(P_n - P_{n-1}) / P_n \leq 1.0 \times 10^{-2} \quad (15)$$

ここで、 P_n は載荷荷重、 n は収束計算回数である。

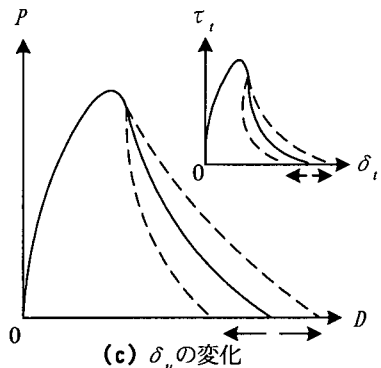
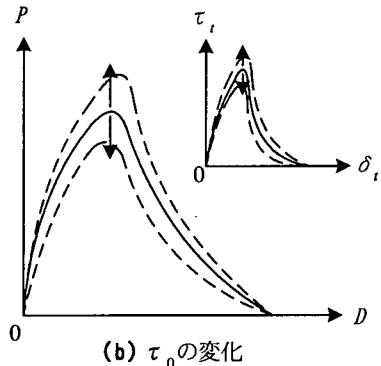
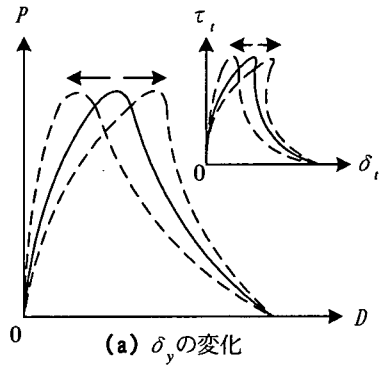


図-10 付着応力-すべり関係の同定

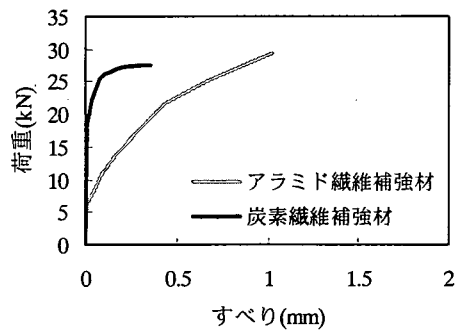
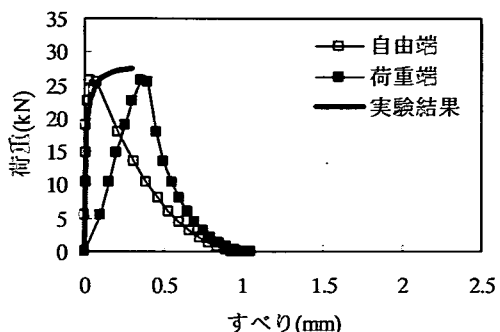
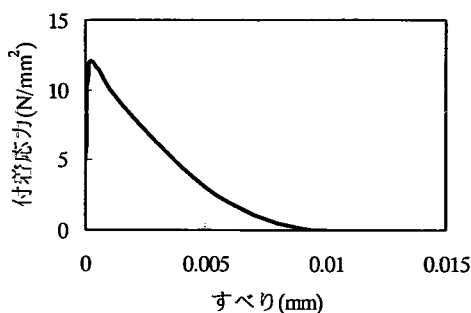


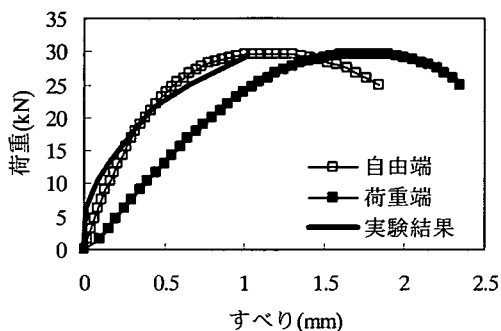
図-11 荷重-自由端すべり関係(実験結果)



(a) 炭素繊維補強材

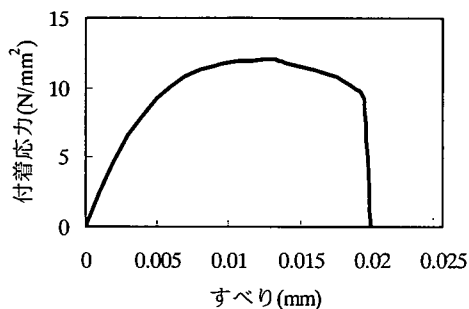


(a) 炭素繊維補強材



(b) アラミド繊維補強材

図-12 荷重-すべり関係



(b) アラミド繊維補強材

図-13 付着応力-すべり関係

b) 付着応力-すべり関係の決定方法

式(13), 式(14)で表される付着応力-すべり関係を同定するためには, 5つの係数を決定しなければならない. そこで, 係数を様々に変化させて, 本論文で提案した付着要素を用いた付着引抜き試験(図-7)の有限要素解析を行った. その結果, 付着応力-すべり関係と荷重(P)-すべり(D)関係の間には図-10に示す相関関係が存在し, その形状は非常に似通ったものとなった. このようになった理由として, ①試験方法が単純であること, ②付着要素の B_{ii} 値のみに非線形性を与え, その他の要素はすべて線形弾性体と仮定していることが考えられる.

したがって, 付着応力-すべり関係の同定は以下の順序で進めていくことにした.

- ① 実験結果(荷重-すべり関係)の形状から, 係数 a , b を試行錯誤的に決定する. このとき, 残り3係数にも任意の定数を代入する.
- ② 解析結果と実験結果を比較し, 最大付着応力 τ_0 , 最大付着応力が生じるときのすべり δ_y , 最大すべり δ_u の順に係数を決定する.

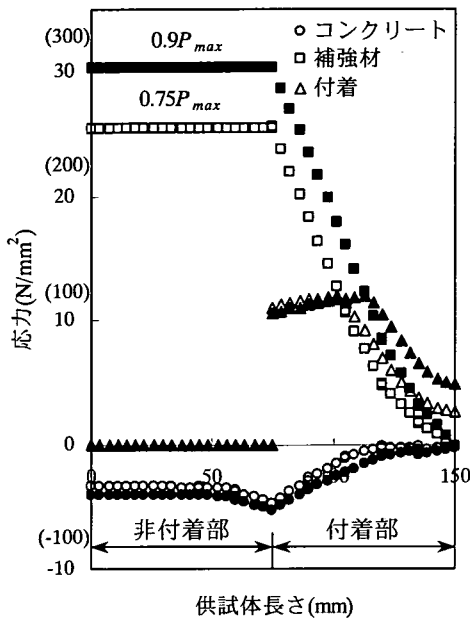
また, 以下の点に注意を払い, 係数を決定した.

- ① 実験は荷重制御で行われたため, 最大荷重以後の測定が不可能であった. このことから, 最大荷重とその時のすべりに注目する.
- ② 実験結果にはある程度のばらつきが存在することを考慮すれば, 実験で得られた荷重-すべり関係に近い関係が得られ, できるだけ簡単な数字で表された付着応力-すべり関係を求めることが望ましいと考えられる.
- ③ 本研究は, 付着引抜き試験で得られた荷重-すべり関係から付着応力-すべり関係を同定する手法に主眼を置くものである. したがって, 実験結果の一例を取り上げて, 以下の議論を進めることにする.

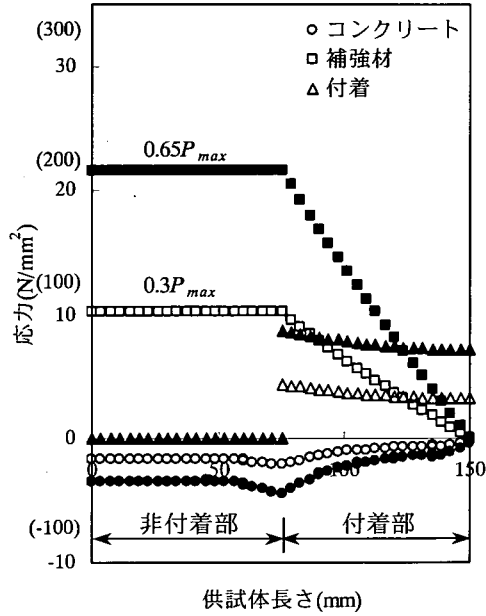
(3) 解析結果

a) 付着応力-すべり関係

図-11に, 実験から得られた荷重-自由端すべり関係を示す. どちらの連続繊維補強材を用いた供試体も補強材の抜け出しによって終局に至り, コンク



(a) 炭素繊維補強材



(b) アラムド繊維補強材

図-14 応力分布

リート表面に達するひび割れ(主ひび割れ)は発生しなかった。組紐状アラミド繊維補強材は、最大荷重の3分の1程度の小さな荷重段階からすべり出し、その後、すべりの増加に伴って荷重も増加し、最大荷重に達した。一方、より線状炭素繊維補強材は0.1(mm)程度の小さなすべりで急激に抜け出した。試験は荷重制御で行ったため、どちらの連続繊維補強材を用いた供試体も最大荷重以後の挙動を十分に把握することができなかったが、連続繊維補強材の種類や表面形状、弾性係数等の違いによって、異なった付着性状が観察された。

次に、解析から得られた荷重-すべり関係を図-12(a), (b)に示す。また、図-12には図-11に示した実験結果もあわせて表示している。これより、最大荷重に至るまでの間、荷重-自由端すべり関係の実験結果と解析結果がほぼ一致していることがわかる。ここで、図-12に示す解析結果は、最大荷重までの荷重-自由端すべり関係が実験結果に良く適合するように、4(2)節に述べた方法で試行錯誤的に付着応力-すべり関係を仮定して求められた結果である。したがって、荷重-自由端すべり関係は一致していると判断し、各解析で仮定した付着応力-すべり関係が決定された。式(13)、式(14)で表される付着要素の $[B_b]$ マトリクス中の B_b 値に導入したより線状

炭素繊維補強材と組紐状アラミド繊維補強材の付着応力-すべり関係を図-13(a), (b)に示す。それぞれの曲線は、具体的に以下のとおり示される。

より線状炭素繊維補強材：

$$\tau_t = 12 \cdot \left[1 - \left(1 - \frac{\delta_t}{0.0002} \right)^2 \right] \quad (0 \leq \delta_t \leq 0.0002) \quad (16)$$

$$\tau_t = 12 \cdot \left(\frac{0.01 - \delta_t}{0.01 - 0.0002} \right)^2 \quad (0.0002 \leq \delta_t \leq 0.01) \quad (17)$$

組紐状アラミド繊維補強材：

$$\tau_t = 12 \cdot \left[1 - \left(1 - \frac{\delta_t}{0.013} \right)^3 \right] \quad (0 \leq \delta_t \leq 0.013) \quad (18)$$

$$\tau_t = 12 \cdot \left(\frac{0.02 - \delta_t}{0.02 - 0.013} \right)^{0.1} \quad (0.013 \leq \delta_t \leq 0.02) \quad (19)$$

単位は、 τ_t : N/mm², δ_t : mm である。

これらの結果からも、より線状炭素繊維補強材と組紐状アラミド繊維補強材の付着性状の違いが明確に表れた。より線状炭素繊維補強材は、最大付着応力までほとんどすべりが生じず、その後、急激に付

着応力が減少する。一方、組紐状アラミド繊維補強材は、小さな付着応力からすべり始め、炭素に比べて最大すべりが大きい。

一般に、補強材にひずみゲージを貼り付けると付着作用に影響を及ぼすため、付着引抜き試験法では荷重とすべりを測定して、付着の評価を行っている。また、付着両引き試験法では荷重、すべりの他にコンクリートに発生するひび割れを観察し、付着作用の評価を行っている。ひずみ分布を測定するためには、ひずみゲージを埋め込んだ補強材を用いて、煩雑な実験^{2), 3), 4)}を行わなければならない。しかし、非常に微細な繊維を樹脂で固めて作られる連続繊維補強材の場合、その手法をそのまま用いることは困難である。

本解析では、最も単純な付着試験であると考えられる付着引抜き試験で得られた荷重-自由端すべり関係から、付着応力-すべり関係を同定することができた。これにより、より線状炭素繊維補強材と組紐状アラミド繊維補強材の付着性状の相違を明確に示すことができた。また、従来のように、付着試験から得られた平均付着応力や最大付着応力や任意のすべりに対する付着応力で補強材の付着作用を評価するだけでは不十分であることが明らかとなった。連続繊維補強材には様々な種類があり、またその表面加工形状も多岐にわたっている。丸鋼と異なり、機械的抵抗を高めるための表面加工を施された補強材の場合、コンクリートと補強材の間の付着応力伝達機構はその表面形状の影響を強く受ける。したがって、付着引抜き試験と付着要素を用いた有限要素解析を組み合わせて実施することによって、様々な種類の補強材の付着応力伝達機構を把握することが可能となると考えられる。本研究で提案した付着要素はコンクリートと補強材間の界面で局所的に生じている現象を明確に表すことができる。このように、付着を個別の要素として取り扱うことによって、付着の作用がコンクリート構造物全体、あるいはそれを構成する部分(コンクリートや補強材)に及ぼす影響を詳細に把握することができるのである。

b) 応力分布

付着引抜き試験の2次元有限要素解析について、図-14(a), (b)に各要素の応力分布を示す。図の横軸は荷重端側からの距離、縦軸は各要素の応力、()内の数値は補強材要素の応力である。ここで、コンクリート要素の応力とは、補強材要素と接している部分の軸方向応力である。また、これらはすべて最大荷重(P_{max})に達する前の段階で、白マーカーから黒マーカーへと荷重が増加している。それぞれの荷重レベルは、図にあわせて示してある。

これらの結果からも、2種類の連続繊維補強材について付着応力伝達機構の相違が確認できる。より線状炭素繊維補強材は最大付着応力が発生する部分が荷重端側から自由端側に移動していくが、組紐状アラミド繊維補強材では付着長全域の付着応力が徐々に増加する様子が見られた。今回、実験および解析を行ったような最終的に補強材の抜け出しで終局に至る付着長(75(mm))の付着引抜き試験の場合、より線状炭素繊維補強材では伝達長が徐々に短くなるが、組紐状アラミド繊維補強材では付着長全域で抵抗する付着作用の相違が確認された。このような付着作用の相違は、過去に実施された丸鋼と異形鉄筋の付着引抜き試験結果^{2), 23)}と類似している。このことから、より線状炭素繊維補強材と組紐状アラミド繊維補強材の付着応力伝達機構の違いは、特に表面形状の違いが影響を及ぼしたもので、より線の表面形状は機械的な抵抗力を高める効果があるものと考えられる。

5. 結論

本研究で得られた結果は以下のとおりである。

- (1) コンクリートと補強材間の付着応力伝達機構を表現することのできる付着要素を提案した。付着要素は、コンクリート要素と補強材要素に接触する線要素として表現し、非線形な付着応力-すべり関係を導入した。
- (2) 付着引抜き試験で得られた荷重-すべり関係から、数値解析的に付着応力-すべり関係を同定することができた。本解析手法を用いることによって、より線状炭素繊維補強材と組紐状アラミド繊維補強材の付着作用の違いを明らかにすることができた。
- (3) 付着試験と、本論文で提案した付着作用を考慮した有限要素解析を組み合わせて行うことによって、付着応力伝達機構をより詳細に把握することができる。
- (4) 本研究で提案した付着要素は、付着作用が構造全体に及ぼす影響、あるいは付着作用が局所的にコンクリートや補強材に及ぼす影響を明らかにするための有効な手段である。

参考文献

- 1) 土木学会:連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針, コンクリートライブラリー101, 2000.
- 2) 水野高明, 渡辺 明:丸鋼, 異形丸鋼および異形ねじ

- り鉄筋の付着に関する研究, 土木学会論文集, No.93, pp.23-30, 1963.
- 3) Mains, R.M. : Measurement of the Distribution of Tensile and Bond Stresses Along Reinforcing Bars, *Journal of ACI*, Vol.23, No.3, 1951.
 - 4) 六車 照, 森田司郎, 富田幸次郎: 鋼とコンクリートの付着に関する基礎的研究(I 付着応力分布について)-(I), 日本建築学会論文報告集, No.131, pp.1-8, 1967.
 - 5) 六車 照, 森田司郎, 富田幸次郎: 鋼とコンクリートの付着に関する基礎的研究(I 付着応力分布について)-(II), 日本建築学会論文報告集, No.132, pp.1-6, 1967.
 - 6) 六車 照, 森田司郎: 鋼とコンクリートの付着に関する基礎的研究(II 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, No.134, pp.1-8, 1967.
 - 7) 六車 照, 森田司郎: 鋼とコンクリートの付着に関する基礎的研究(III 引抜試験について), 日本建築学会論文報告集, No.139, pp.1-10, 1967.
 - 8) 池田尚治: 鉄筋コンクリート部材における鉄筋とコンクリートとの応力伝達に関する研究, 土木学会論文集, No.307, pp.85-97, 1981.
 - 9) Ferguson, P.M. and Thompson, J.N. : Development Length of High Strength Reinforcing Bars in Bond, *Journal of ACI*, pp.887-922, 1962.
 - 10) Mirza, S.M. and Houde, J. : Study of Bond Stress-Slip Relationships in Reinforced Concrete, *ACI Journal*, pp.19-46, 1979.
 - 11) Broms, B.B. : Technique for Investigation of Internal Cracks in Reinforced Concrete Members, *ACI Journal*, Vol.62, No.1, pp.35-44, 1965.
 - 12) Goto, Y. : Cracks Formed in Concrete Around Deformed Tension Bars, *ACI Journal*, Vol.68, No.4, pp.244-251, 1971.
 - 13) 小林一輔: 新素材とコンクリート, 土木学会論文集, No.420/V-13, pp.17-28, 1990.
 - 14) Mahmoud, Z.I., Rizkalla, S.H. and Zaghoul, E.R. : Transfer and Development Length of Carbon Fiber Reinforced Polymers Prestressing Reinforcement, *ACI Structural Journal*, No.96, pp.594-602, 1999.
 - 15) Lees, J.M. and Burgoyne, C.J. : Experimental Study of Influence of Bond on Flexural Behavior of Concrete Beams Pretensioned with Aramid Fiber Reinforced Plastics, *ACI Structural Journal*, No.96, pp.377-385, 1999.
 - 16) ASCE: State-of-the-Art Report on Finite Element Analysis of Reinforced Concrete, ASCE Task Committee on Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Structures of the Structural Division Committee on Concrete and Masonry Structures, 1982.
 - 17) Ngo, D. and Scordelis, A.C. : Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Beams, *ACI Journal*, No.64, pp.152-163, 1967.
 - 18) Nilson, A.R. : Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete by the Finite Element Method, *ACI Journal*, No.65, pp.757-766, 1968.
 - 19) Monti, G. and Spacone, E. : RC Beam Column FE Including Bond-Slip, Seminar on Post-Peak Behavior of RC Structures Subjected to Seismic Loads-Recent Advances and Challenges on Analysis and Design-, Committee on Post-Peak Behavior of RC Structures, JCI, Vol.1, pp.141-155, 1999.
 - 20) 松尾真紀, 日比野憲太, 高木宣章, 児島孝之: コンクリートのひび割れを表現する離散モデルとその基本的特性, 土木学会論文集, No.655/V-48, pp.1-12, 2000.
 - 21) 波田匡司: 連続繊維棒材の付着性状に関する実験的研究, 修士論文, 立命館大学, 1996.
 - 22) 児島孝之, 高木宣章, 波田匡司, 井上真也: 棒材の付着性状へのシリカフェームの影響, 土木学会関西支部年次学術講演概要集, V-14-1~2, 1995.
 - 23) 田 政範, 島田静雄: 鉄筋とコンクリートとの付着に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, No.217, pp.87-98, 1973.

(2001.8.30 受付)

NUMERICAL APPROACH OF BOND BEHAVIOR BETWEEN CONCRETE AND FIBER REINFORCED PLASTIC ROD

Maki MATSUO, Junichiro NIWA and Takayuki KOJIMA

The finite element model for bond between the reinforcement and the surrounding concrete was newly proposed. The bond characteristics were expressed as the isoparametric quadratic linear element and it was based on the non-linear bond stress-slip relationship. Two-dimensional finite element analysis on the pull-out test was carried out by the use of this model and comparisons were made with test results. The difference of the bond characteristics between two kinds of fiber reinforced plastic rods, i.e. twisted carbon fiber rod and braided aramid fiber rod has been numerically presented.