

## 論文 鉄筋の付着を制御した RC 梁のせん断耐荷挙動に関する研究

内堀 洋紀<sup>\*1</sup>・睦好 宏史<sup>\*2</sup>・Govinda Raj Pandey<sup>\*3</sup>・谷野 良輔<sup>\*4</sup>

**要旨**：本研究は、鉄筋コンクリートの付着性状が RC 梁のせん断耐力、破壊形式、耐荷機構におよぼす影響を、実験および解析により明らかにしたものである。すなわち、引張鉄筋の付着性状を様々に変化させた鉄筋コンクリート梁を製作し、載荷実験を行い、鉄筋の付着性状が RC 梁の力学性状に及ぼす影響を明らかにした。さらに、3次元有限要素解析を行うことによって、鉄筋の付着性状とせん断耐荷挙動との関係を数値的に明らかにした。

**キーワード**：付着、RC 梁、せん断破壊、せん断耐力、アーチ機構、圧縮ストラット

## 1. はじめに

これまで、鉄筋とコンクリートにおける付着による相互作用が、鉄筋コンクリート部材の耐力や破壊機構に大きな影響を及ぼすことが言及されてきた。例えば、池田ら<sup>1)</sup>は、付着の有無が、RC 梁のせん断破壊性状に及ぼす影響、付着の有無とせん断耐力との関係、そして付着の有無と残存アーチ機構との関係等を実験および解析により求めている。その中で、鉄筋コンクリート梁において、引張鉄筋の付着が無く、かつ、両端で十分に定着されているならば、せん断スパン比( $a/d$ )が特に小さくない限り、斜めひびわれが発生せず、せん断破壊に至らないことを指摘している。

鉄筋の付着を制御すれば、せん断破壊が防止できることから、柱橋脚などの耐震構造物に適用できることが考えられ、その適用性が実証されている<sup>2,3)</sup>。しかし、付着を制御した RC 部材のせん断耐力、耐荷機構などはほとんど明らかにされていない。本研究は、引張鉄筋の付着性状を様々に変化させた RC 梁を製作し、載荷実験を行い、鉄筋の付着性状とせん断耐荷挙動の基本的関係を明らかにしようとするものである。さらに、3次元有限要素解析により、数値的に

解明した。

## 2. 実験概要

## 2.1 供試体概要

今回実験に用いた梁の供試体の形状寸法を図-1、図-2に、実験要因を表-1に示す。実験供試体の梁は、断面が  $150 \times 200\text{mm}$ 、長さが  $2400\text{mm}$  である。今回の実験においては、鉄筋の付着性状とせん断耐荷挙動との関係の解明が大きな目的であることから、引張鉄筋の付着の有無を主なパラメータとして、供試体を A シリーズ、B シリーズ各 5 体ずつ製作した。両シリーズとも全ての供試体で同一寸法、同一配筋であり、せん断スパン内にスターラップは配置せず、せん断スパン比( $a/d$ )を A シリーズは 3.0、B シリーズは 2.5 とした。基準供試体となる A-1/B-1 供試体は、通常の異形鉄筋を用いて、せん断破壊が生じるように耐力比(せん断耐力/曲げ耐力)をそれぞれ 0.50、0.45 とした。A-2/B-2 供試体は、引張鉄筋をアンボンドとし、A-3/B-3 供試体は異形鉄筋の替わりに丸鋼を使用した。A-4/B-4 供試体は丸鋼表面を紙ヤスリで磨き、その上からグリースを塗布したものである。そして、A-5/B-5 供試体は異形鉄筋にエポキシをコーティングしたものである。

\*1 さいたま市 [元埼玉大学大学院 理工学研究科 建設工学専攻] (正会員)

\*2 埼玉大学 工学部 建設工学科 教授 工博 (正会員)

\*3 埼玉大学大学院 理工学研究科 建設工学専攻 工修 (正会員)

\*4 埼玉大学大学院 理工学研究科 建設工学専攻

表-1 実験要因

シリーズ	No.	付着状態	a/d	耐力比 <sup>注)</sup>
A	1	異形鉄筋	3.0	0.50
	2	アンボンド筋		
	3	丸鋼		
	4	丸鋼+グリース		
	5	エポキシ筋		
B	1	異形鉄筋	2.5	0.45
	2	アンボンド筋		
	3	丸鋼		
	4	丸鋼+グリース		
	5	エポキシ筋		

注)せん断耐力は異形鉄筋を用いて岡村・檜貝式により計算した。

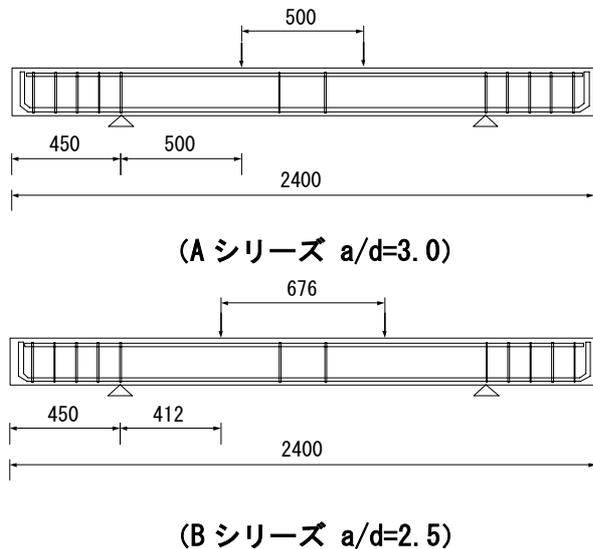


図-1 供試体の形状寸法

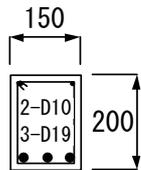


図-2 供試体の断面

## 2.2 付着の制御方法

引張鉄筋の付着は以下の方法により制御した。A-2/B-2 供試体は、実験で引張鉄筋として使用する異形鉄筋(D19)をスパイラルシース(φ23)の中に配置することによって付着を完全に切った。アンボンドとした区間は左側の支点から右側の支点までとし、それを越えた部分はスパイラルシースを配置しておらず、通常の付着を有する

異形鉄筋となる。A-4/B-4 供試体では、丸鋼を紙ヤスリで鉄筋表面を削り皮膜を剥がして、グリースを塗布することにより、付着をできるだけ無くすようにした。なお、丸鋼を使用した場合には、梁端部で180度折り曲げて十分な定着をとるようにした。さらに、A-5/B-5 供試体は、異形鉄筋の表面に、粘性の低いエポキシをコーティングし、できるだけ、節高さが局所的に変わらないように注意した。

引張鉄筋に使用した鉄筋の材料特性と各供試体のコンクリート圧縮強度を表-2、表-3に示す。

鉄筋の材料特性において、異形鉄筋、丸鋼は、共に径は同じであるが、降伏強度は丸鋼が異形鉄筋より、低くなっていることがわかる。

表-2 鉄筋の材料特性

種類	規格	降伏強度 (MPa)
異形鉄筋	D19 SD345	371
丸鋼	φ19 SS400	312

表-3 各供試体のコンクリートの圧縮強度

	圧縮強度 (MPa)		圧縮強度 (MPa)
A-1	36.0	B-1	38.2
A-2	36.2	B-2	37.9
A-3	32.6	B-3	38.4
A-4	33.2	B-4	37.3
A-5	28.9	B-5	35.5

## 2.3 付着状態

各供試体に使用した鉄筋の付着状態は鉄筋の引抜試験で確認した。引抜試験はコンクリート標準示所方書〔規準編〕JSCE-G 503-1999に準じるもので、片引きであり、その結果を図-3に示す。

X軸は自由端における鉄筋のすべり量であり、Y軸は平均付着応力度を示している。ここで言う平均付着応力度とは、引抜荷重を鉄筋表面とコンクリートとの接着面積で除した値である。最大平均付着応力度の大小関係は、大きい方から、異形鉄筋(P-1)、エポキシ筋(P-2)、丸鋼(P-3)、

丸鋼+グリース(P-4), アンボンド筋となっていることがわかる。

## 2.4 荷重方法

供試体の設置および荷重概要を図-4に示す。荷重方法は500kN油圧ジャッキを用い、荷重分配桁を使用して、2点集中荷重を静的に荷重させた。

## 3. 実験結果と考察

### 3.1 荷重-変位関係

Aシリーズ(a/d=3.0)の荷重-変位関係を図-5, 荷重終了時のひびわれ性状を図-7に示す。A-1(異形鉄筋), A-3(丸鋼), A-5(エポキシ)は、斜め引張によるせん断破壊であった。その一方で、付着のほとんど無いA-4(丸鋼+グリース)は曲げ引張破壊, 付着の無いA-2(アンボンド)は、曲げ圧縮破壊となり、共に最大耐力が大幅に上昇した。この結果からもわかるように、付着性状が破壊形式に大きく影響を与えている。ここで、A-4が曲げ降伏しているのにも関わらず、A-2ほど荷重が上昇しないのは、鉄筋の材料特性の違いによるためである。また、斜め引張破壊をしたA-1, A-3, A-5について、せん断耐力を比較すると、最大平均付着応力度とせん断耐力の関係はほとんど無いと言える。すなわち、図-3のP-3(丸鋼)とP-1(異形鉄筋)/P-2(エポキシ)の最大平均付着応力度が大きく異なっているのにも関わらず、せん断耐力に大きな違いが見られないためである。次に、図-7のひびわれ性状を見ると、A-3(丸鋼)のひびわれ数は、A-1(異形鉄筋)のひびわれ数と大差は無く、鉄筋の最大平均付着応力度が大きいA-5(エポキシ)よりもひびわれ数は多い。このことから、ひびわれ数は、鉄筋とコンクリートの付着剛性に関係し、鉄筋の最大平均付着応力度がコンクリートの引張強度(コンクリートの圧縮強度35MPaで約2MPa)を越えなければ、せん断スパン内にひびわれは入らず、斜めひびわれに進展しないため、A-2(アンボンド), A-4(丸鋼+グリース)は、せん断破壊に至らなかったと考えられる。

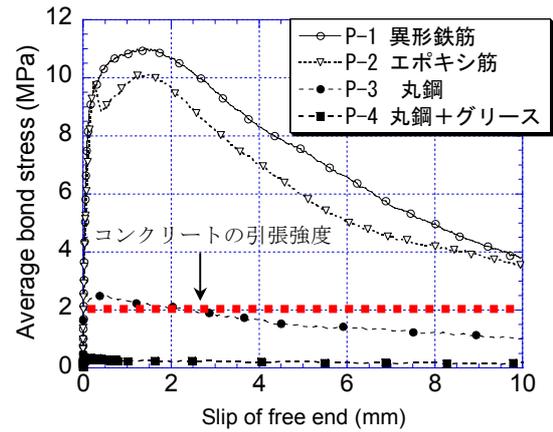


図-3 自由端すべり-平均付着応力度

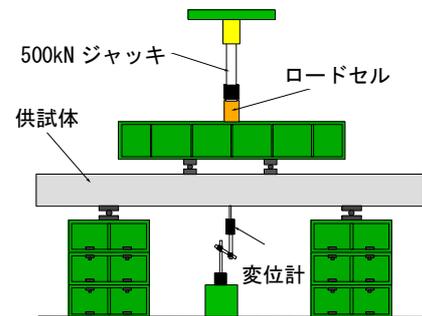


図-4 セットアップ図

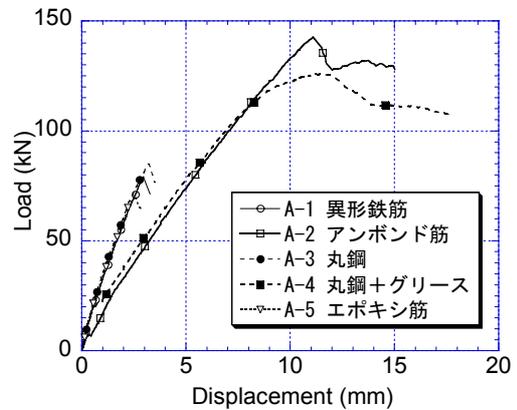


図-5 Aシリーズ 荷重-変位関係

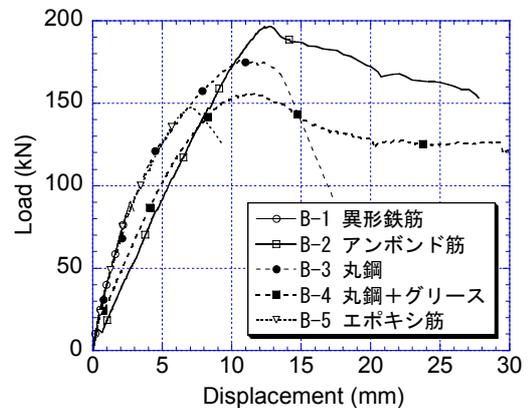


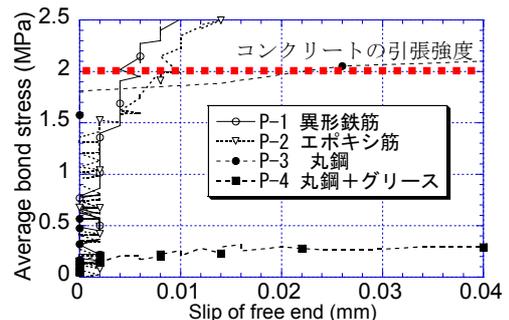
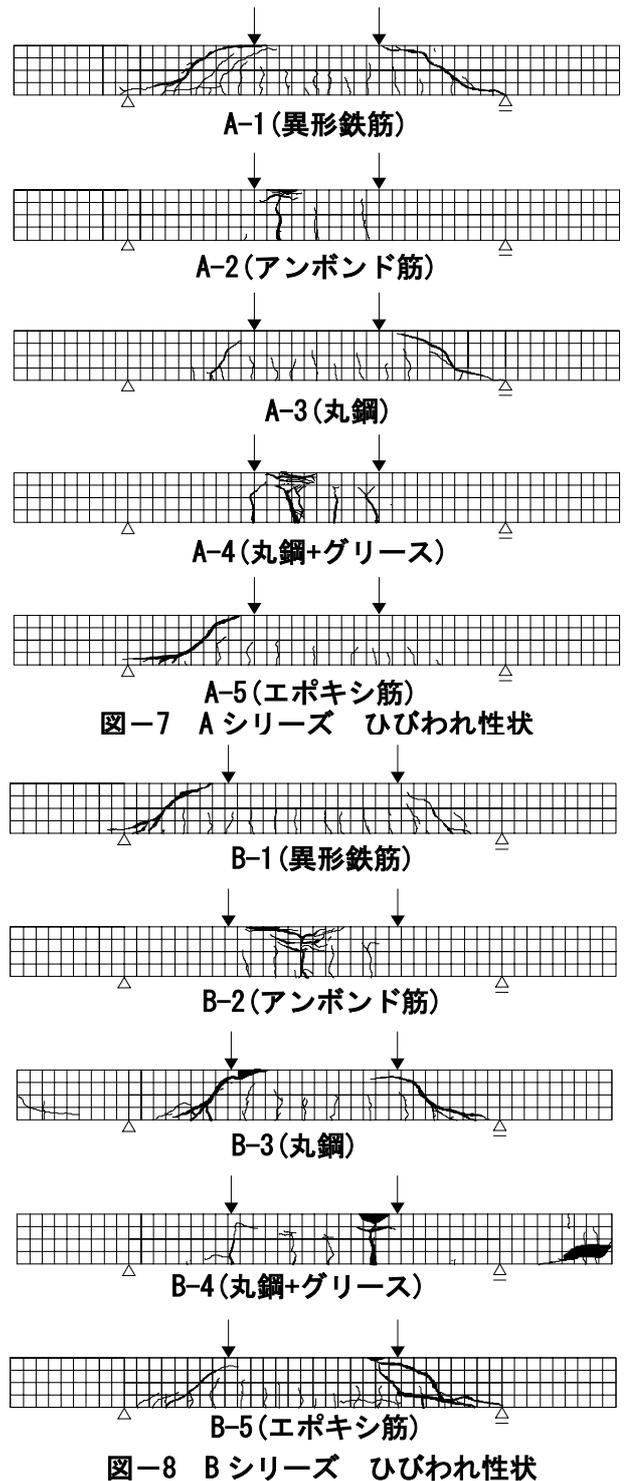
図-6 Bシリーズ 荷重-変位関係

また、ここで言う付着剛性とは、平均付着応力度—すべり量関係における初期の傾きである。

**図-9** (**図-3**を原点付近で拡大したもの) からわかるように、A-1(異形鉄筋)のひびわれ数と大差が無かったA-4に使用した鉄筋、丸鋼(P-3)の付着剛性は、異形鉄筋(P-1)とそれほど違いが無いものとなっている。さらに、曲げひびわれ発生後、A-2, A-4の剛性が急激に低くなるのは、付着がほとんど存在しないことにより、鉄筋のひずみが全長に渡り一様となるため、同変位において測定される荷重が、通常、異形鉄筋を使用したRCよりも小さくなるからである。次に、Bシリーズ( $a/d=2.5$ )の荷重—変位関係を**図-6**、載荷終了時のひびわれ性状を**図-8**に示す。B-1(異形鉄筋)は斜め引張破壊となり、B-3(丸鋼), B-5(エポキシ)は斜めひびわれ発生後も荷重が増大し、曲げ圧縮縁のコンクリートが圧壊して終局に至った。B-2(アンボンド), B-4(丸鋼+グリース)は、靱性のある曲げ引張破壊となった。ここで、Bシリーズ( $a/d=2.5$ )において、丸鋼(B-3), エポキシ筋(B-5)を使用した供試体は、Aシリーズ( $a/d=3.0$ )におけるそれらの供試体と異なり、斜めひびわれ発生後も荷重が増大し、曲げ圧縮縁のコンクリートが圧壊して終局に至る結果となっている。つまり、このことは、せん断スパン比( $a/d$ )が、鉄筋の付着性状とせん断耐荷挙動との関係に大きな影響を及ぼしたことを意味するものである。

### 3.2 コンクリートのひずみ

Aシリーズ供試体の梁中央から左側650mm下部位置で計測したコンクリートひずみを**図-10**に示す。A-1は曲げ理論にしたがって、荷重の増加と共に、コンクリートのひずみは引張側に増加している。しかし、鉄筋の付着がほとんど無いA-2, A-4は曲げひびわれが発生したと同時に、ひずみは圧縮側に移行し、荷重の増加と共に圧縮ひずみが増加した。また、A-3, A-5のひずみも、最終的には圧縮側に移行する結果となった。これらについては、Bシリーズにおいても同様であった。以上のことより、付着が



**図-9** 自由端すべり—平均付着応力度

無い、もしくは付着が切れることで耐荷機構は変化するものと推察される。

#### 4. 有限要素法による解析

鉄筋の付着性状が RC 梁部材の耐荷機構および破壊メカニズムに及ぼす影響を解明するために 3次元有限要素法により解析を行った。

##### 4.1 解析概要

解析に用いたプログラムは東京大学において開発された 3次元有限要素解析プログラム COM3<sup>4,5)</sup>を用いて行った。本解析プログラムはひびわれを有する様々な鉄筋コンクリート構造の経路依存の 3次元非線形挙動を精度良く再現することが可能である。本検討で用いた解析モデルを

図-11 に示す。解析時間を短縮するため、実験供試体の 1/2 領域を解析対象とした。コンクリートには 20 節点 3次元 RC 立体要素 (RC solid element) を、アンボンド筋を用いる引張鉄筋には 3 節点 3次元梁要素 (Beam element) を用いてモデル化した。解析に使用したコンクリートおよび鉄筋の材料定数は、表-2、表-3 の実測値を用いた。また、1 つのモデルで、付着状態の異なる鉄筋を使用した部材の解析への拡張性を考慮して、せん断すべりが考慮可能な 6 節点 1次元接合要素 (Joint element) を RC 立体要素と梁要素の間に組み込むこととした。なお、アンボンド供試体 (A-2/B-2) では、このせん断すべり剛性を 0 として解析を行っている。接合要素の概略図を、図-12 に示す。

##### 4.2 解析結果

解析によって得られた A-1/B-1 (異形鉄筋)、A-2/B-2 (アンボンド筋) の荷重-変位関係の比較を図-13 に示す。実験結果、解析結果ともにいずれの供試体においても破壊モードは一致しており、また、降伏変位や剛性、最大荷重においても比較的一致している。

##### 4.3 主圧縮応力状態

図-14 に、解析から得られた各供試体の主圧縮応力線図を示す。図では、各要素におけるガウス点での主圧縮応力を抽出して図化したもので、全ての供試体において荷重が 70kN における状

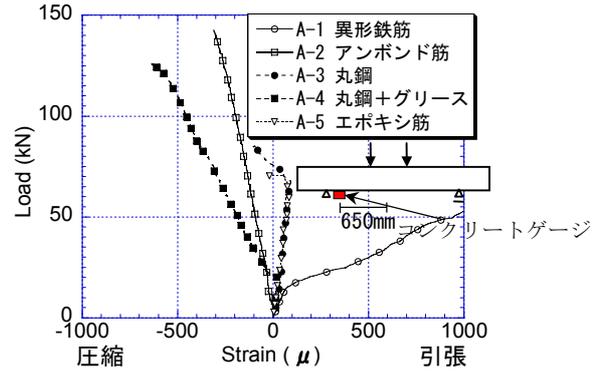


図-10 コンクリートひずみ ( A シリーズ )

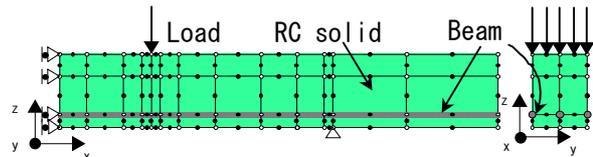


図-11 A シリーズ 解析メッシュ図

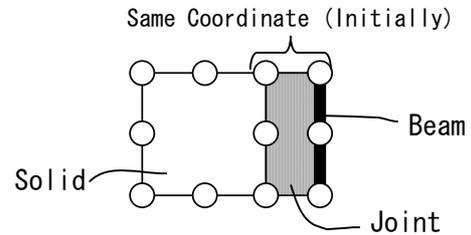


図-12 接合要素の概略図

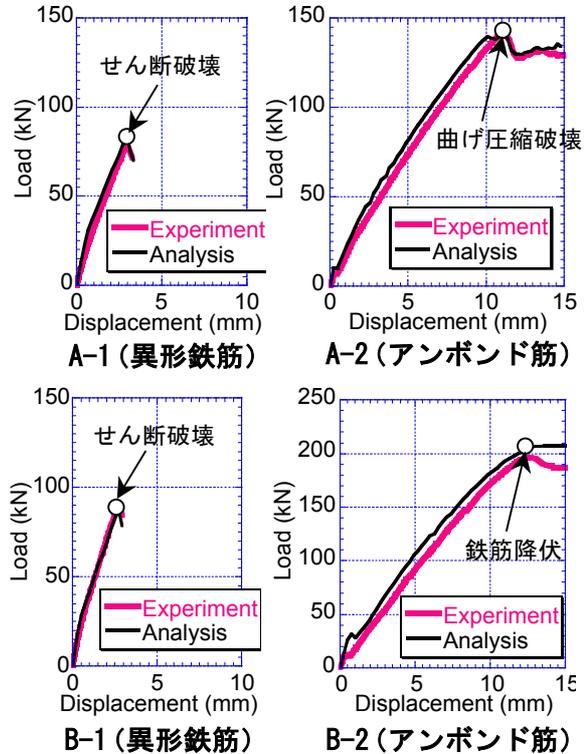


図-13 荷重-変位関係

状態について示している。なお、主圧縮応力の大小は直線の長さで表している。通常の異形鉄

筋を引張鉄筋に使用した供試体 (A-1/B-1) の主圧縮応力状態は、「斜めひびわれが主圧縮応力の方向に発生する」という一般的な考え方と合致しているのに対し、引張鉄筋の付着を切った供試体 (A-2/B-2) の主圧縮応力状態は、それとは全く異なり、せん断スパン内において、荷点と支点を結ぶ方向に、直線的な状態として表されている。すなわち、このことは、鉄筋コンクリート梁において、引張鉄筋の付着を切ると、せん断スパン内で強固な圧縮ストラットが形成され、全体として、タイドアーチ的な挙動となることを意味するものである。そのため、せん断耐力が大幅に改善される結果に至ったものと考えられる。また、支点付近の主圧縮応力は、部材軸方向とほぼ平行であり、実験結果の図-10において圧縮ひずみが測定された現象とも整合する結果となっている。

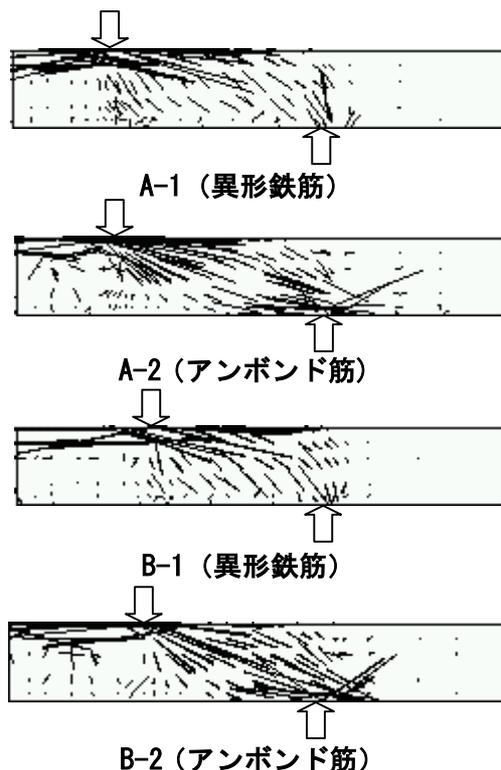


図-14 主圧縮応力状態 (70kN時)

## 5. まとめ

鉄筋の付着性状とせん断耐荷挙動との関係を明らかにすることを目的として、引張鉄筋の付着性状を様々に変化させた鉄筋コンクリート梁

の単調2点荷重実験、有限要素法による解析を行った。本研究の範囲から以下のことが言える。

- 1) RC梁における引張鉄筋の付着を切ることによって、大幅にせん断耐力が改善されることが明らかとなった。また、3次元有限要素解析を行うことによって、その挙動を精度良くシミュレートできた。
- 2) 通常の異形鉄筋を用いたRC梁とは異なり、引張鉄筋の付着を切ることによって、せん断スパン内において、強固な圧縮ストラットが形成され、梁全体の挙動メカニズムがアーチ機構に変化することが明らかとなった。

謝辞：3次元有限要素解析を行うにあたって、東京大学 前川宏一教授に多大なる御支援を頂いた。ここに記して感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 池田尚治, 宇治公隆：鉄筋コンクリートはりのせん断耐荷挙動に及ぼす鉄筋の付着の影響に関する研究, 土木学会論文集報告集, 第293号, pp. 101-109, 1980
- 2) 杉田清隆, 睦好 宏史, Govinda Raj Pandey, 内堀洋紀：鉄筋の付着を制御したRC部材の靱性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.2, pp.1411-1416, 2003
- 3) Pandey, G. R., Mutsuyoshi, H., Sugita, K., Uchibori, H.: Mitigation of seismic damage of RC Structures controlling bond of reinforcement, Proceedings of JCI, Vol.25, No.2, pp.1441-1446, 2003
- 4) 岡村甫, 前川宏一：鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則, 技報堂出版, 1991.5
- 5) Maekawa, K., Piman, A., OKAMURA, H.: NONLINEAR MECHANICS OF REINFORCED CONCRETE, SPON PRESS