

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

STUDIES ON THE EFFECT OF BOND ON THE SHEAR
BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE BEAMS

池田 尚治*・宇治 公隆**
By Shoji IKEDA and Kimitaka UJI

1. まえがき

鉄筋コンクリートはりのせん断耐荷挙動は、一般に腹部に発生する斜めひびわれと関連させて考える必要がある。腹部補強のないはりのせん断耐力は、斜めひびわれ発生と同時に急激に耐力が低下する場合と、斜めひびわれ発生後にある程度の耐力を示す場合がある。前者はせん断支間桁高比 a/d (以下 a/d と記す) が比較的大きい場合のせん断破壊状態を示し、斜め引張破壊とよばれている。後者の場合は a/d が比較的小さいはりのせん断破壊の状態を示し、この耐力は斜めひびわれ発生後の残存アーチ機構に依存している。Kani は、これらの耐力を鉄筋とコンクリートとの付着に関連させた独特の歯機構造の概念等を用いて図-1 に示すような a/d の関数として表わした¹⁾。また、鉄筋の付着のない状態を仮想したはりのせん断スパン部分に該当するコンクリート体の斜め圧縮試験、および引用した Leonhardt らの実験結果²⁾から鉄筋とコンクリートとの付着が鉄筋コンクリートはりのせん断耐力を低下させることを述べている¹⁾。これに対して、Leonhardt は別の実験結果から鉄筋とコンクリートとの付着が鉄筋コンクリートはりのせん断耐力を向上させるという逆の考えを述べている³⁾。また、Swamy らは付着のない鉄筋を用いて実験を行ったが⁴⁾、付着の有無が鉄筋コンクリートはりに

及ぼす影響についての明確な結果を得ていないようである。したがって、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付着が部材のせん断耐荷挙動に及ぼす影響についてはまだ基本的な点で解明されていない重要なことがらが存在していると思われる。

一方、近年、鉄筋の高強度化および太径化が進められ、その結果、主としてコンクリート表面のひびわれ幅を制限する必要性から、付着のよい異形鉄筋が要望されている。鉄筋の付着の良好なことは、鉄筋とコンクリートとの複合効果の観点からも当然その重要性が認識されており、そのため、実用上からは付着のもつ有用性のみが強く評価、追求され、付着のもつ基本的な特性についての検討がほとんど行われていないものと思われる。

本研究は、以上に述べた状況を背景として、鉄筋コンクリートの複合機構の基本である鉄筋とコンクリートとの付着について、それが部材のせん断耐荷挙動に及ぼす影響を基本的な点から研究を行うものであって、付着の有無がはりのせん断破壊の形態に及ぼす影響、付着の有無とせん断耐力との関係、および付着の有無とはりの残存アーチ機構との関係、等を実験により求め、この結果を参考にして単純なモデル化による有限要素法解析を行って実験結果と対比し、鉄筋コンクリートはりのせん断耐荷挙動の基本および付着に関する統一的な概念等について論じようとするものである⁵⁾。

2. 実験方法

(1) 使用材料

供試体製造に用いた鉄筋は、引張主鉄筋が SD 30 の D 13、腹鉄筋が SR 24 相当品の $\phi 6$ である。セメントは普通ポルトランドセメントを使用した。細骨材は富士川産川砂(比重 2.70)とし、粗骨材は最大寸法 10 mm の鬼怒川産川砂利とした。表-1 に使用した鉄筋の力学

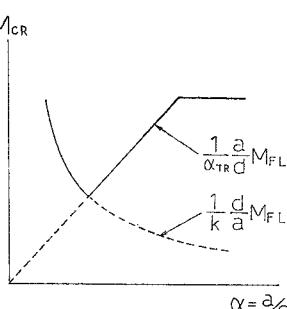


図-1 最大モーメント (M_{cr}) とせん断支間桁高比 (a/d) の関係図¹⁾

* 正会員 工博 横浜国立大学教授 工学部土木工学科
** 学生会員 東京都立大学大学院修士課程

表-1 使用した鉄筋の力学的性質

規 格	寸 法	降伏点応力度 (kg/cm ²)	引張強度 (kg/cm ²)	ヤング係数 (kg/cm ²)	表面形状
SD 30	D 13	3730	5500	2.07×10^6	横ふし
SR 24 相当	ø 6	5460	5650	2.22×10^6	普通丸鋼

表-2 コンクリートの配合および力学的性質

試験時のコンクリート強度 (kg/cm ²)	ヤング係数 (kg/cm ²)	ボアソニ比	粗骨材最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	水セメント比 (%)	単位セメント量 (kg/m ³)	細骨材率 (%)
240	0.20×10^6	0.19	10	8	70	284	49

的特性を示す。

コンクリートの配合はスランプを 8 cm、目標強度を 240 kg/cm² とした。表-2 にコンクリートの配合および硬化コンクリートの力学的性質を示す。

(2) 供試体の製作

本研究では、鉄筋コンクリートはりのせん断耐荷機構と鉄筋の付着との関係を明確に把握できるように鉄筋の付着の有無を実験要因の中心とし、 a/d の相違、腹部補強の有無を関連要因として供試体を製作することとした。

供試体の形状は腹鉄筋のないはりについては a/d を 1.5~5.0 の 6 種類とし、腹鉄筋のあるはりについては a/d を 1.5, 2.5 の 2 種類とした。載荷は単純支持状態で対称 2 点集中荷重とした。各供試体の a/d の値、付着の有無、腹鉄筋の有無は表-3 に示す通りであって、本シリーズにおける供試体の総数は 16 体である。

供試体の断面寸法は幅 10 cm、高さ 20 cm、有効高さ 18 cm とし、引張主鉄筋に D 13 を 3 本使用した。この場合の引張鉄筋比は 2.11% である。腹鉄筋を配置する供試体では鉛直腹鉄筋と 45° 傾斜筋を併用して配置した。この場合 45° 傾斜筋の断面積を $\sqrt{2}$ 倍して鉛直腹鉄筋に換算して考慮すると、腹鉄筋比は 0.64% となる。

鉄筋の付着を除く方法としては、まず鉄筋のふし間をロウで埋め、その上にビニールテープを巻き、さらにその上にグリースを塗って完全に付着のない状態とした。なお付着を除く部分は、はり供試体の両支点間の引張主鉄筋部分とし、支点を越えて定着する部分には付着が健全に働くようにした。供試体の形状および配筋状態の例を 図-2 に示す。

(3) 載荷方法

載荷方法はアムスラー式万能試験機を用い、荷重分配けたを利用して対称 2 点集中荷重を静的に作用させた。

荷重分配けたから供試体上面に荷重を伝える鋼製ローラー

は直径 2.5 cm であり、支点部は直径 9.7 cm のローラーに直接供試体底面が接触するようにした。

荷重の載荷方法としては最初に設計荷重まで作用させてから除荷し、次に設計荷重の 1.5 倍まで載荷して除荷し、ついで終局荷重まで載荷して除荷し、最後に残存耐力まで載荷してはりを破壊させた。なお、ここでいう設計荷重とは、便宜上引張主鉄筋の応力度が計算上現行の土木学会の「無筋および鉄筋コンクリート標準示方書」の許容応力度 1800 kg/cm² になる荷重とし、せん断応力度等は無視している。

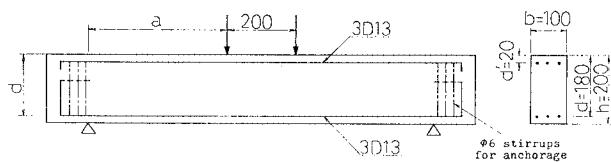
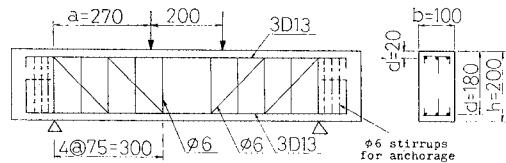
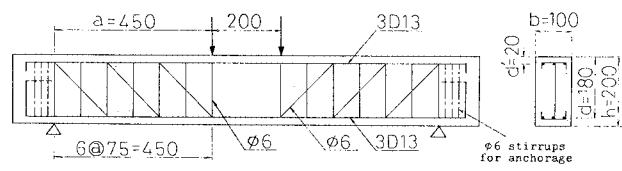
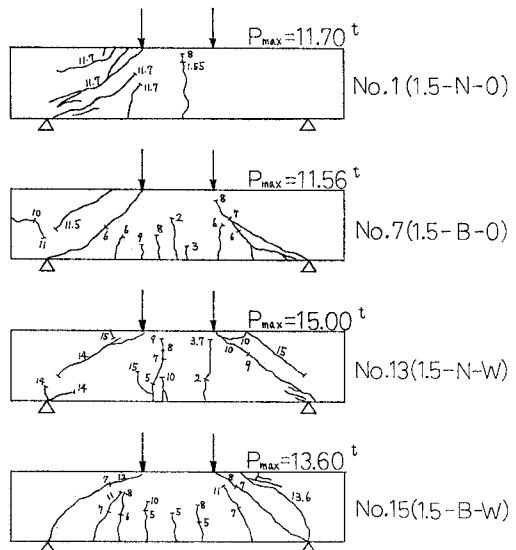
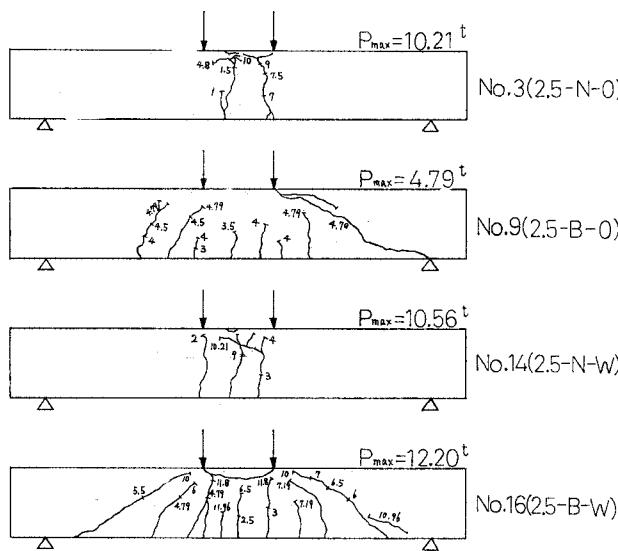


図-2(a) 腹部補強なしの供試体 (No. 1～No. 12)

図-2(b) 腹部補強ありで $a/d=1.5$ の供試体 (No. 13, 15)図-2(c) 腹部補強ありで $a/d=2.5$ の供試体 (No. 14, 16)図-3(a) $a/d=1.5$ の供試体のひびわれ状況

図-3(b) $a/d=2.5$ の供試体のひびわれ状況

3. 実験結果

破壊状況としては、付着のないはりで腹部補強がない場合 a/d が 1.5 および 2.0 の供試体は支点と載荷点とを結ぶ斜めの線に沿った割裂破壊であった（以後この形態を単に割裂破壊、等とよぶ）。付着のないはりで a/d が 2.5 から 5.0 までのはりでは支間中央に早期に曲げひびわれが発生し、それが荷重の増大とともに成長しただけでせん断支間には斜めひびわれはまったく発生せず、終局時の破壊性状は粘りのある曲げ引張破壊であった。一方、付着のあるはりでは、腹部補強がない場合 a/d が 1.5 から 5.0 までのすべての供試体が斜めひびわれの

発生を伴ってせん断破壊した。腹部補強してあるはりでは、 a/d が 2.5 の場合付着の有無にかかわらず曲げ引張破壊であった。しかしながら、腹部補強のある a/d が 1.5 のはりの場合には、腹部補強をあえて不十分にしておいたため斜めひびわれが開口し、曲げ引張破壊には至らなかった。図-3 に各供試体のひびわれ発生および破壊の状況を示す。

この図から明らかなように、鉄筋とコンクリートとの付着の有無が鉄筋コンクリートはりのひびわれの形状にきわめて大きな影響を与えることが示されたのである。

表-3 に各供試体の最大耐力およびそれから求められる最大モーメント、最大せん断応力度を示した。この結果を a/d を変数として図示したのがそれぞれ図-4 および図-5 である。

図-4 から明らかなように、腹部補強がない場合には、鉄筋とコンクリートとの間に付着が存在すると図-1 のごとく a/d が 2.5 付近で最大曲げモーメントが大きく落ち込むが、一方、付着が存在しない場合にはまったくこのような現象はみられず、はりがほぼ断面のもつ曲げ耐力に到達することができるのである。このことは鉄筋とコンクリートとの付着が腹部補強のない鉄筋コンクリートはりのせん断耐力を大きく低下させることを示すものであり、本実験の場合、付着の存在によって耐力が約 1/2 以下にまで低下しているのである。この理由としては図-3 に示されているように、 a/d が小さい場合を除き付着がないと腹部に斜めひびわれが発生せず、したがって、せん断による破壊が起らうことによるものである。これは付着が存在しないとせん断支間部分で平面保持が保たれず、最初から鉄筋表

表-3 各供試体の形状と実験結果

供試体 No.	記号 ¹⁾	a/d	付着	腹部補強	設計荷重 ²⁾ (t)	設計荷重時の せん断応力度 (kg/cm ²)	斜めひびわ れ発生荷重 (t)	破壊荷重 (t)	破 モ メン ト (t-m)	破壊時のせ ん断応力度 (kg/cm ²)	破壊形態
1	1.5-N-O	1.5	なし	なし	7.99	25.4	—	11.70	1.58	37.1	割裂
2	2.0-N-O	2.0	〃	〃	5.99	19.1	—	10.54	1.90	33.5	〃
3	2.5-N-O	2.5	〃	〃	4.79	15.3	—	10.21	2.30	32.4	曲げ
4	3.0-N-O	3.0	〃	〃	3.99	12.7	—	8.00	2.16	25.4	〃
5	3.5-N-O	3.5	〃	〃	3.42	10.9	—	7.45	2.35	23.7	〃
6	5.0-N-O	5.0	〃	〃	2.40	7.6	—	4.88	2.20	15.5	〃
7	1.5-B-O	1.5	あり	〃	7.99	25.4	6.0	11.56	1.56	36.7	せん断圧縮
8	2.0-B-O	2.0	〃	〃	5.99	19.1	5.3	5.76	1.04	18.3	〃
9	2.5-B-O	2.5	〃	〃	4.79	15.3	4.79	4.79	1.08	15.2	斜め引張
10	3.0-B-O	3.0	〃	〃	3.99	12.7	4.42	4.42	1.19	14.0	〃
11	3.5-B-O	3.5	〃	〃	3.42	10.9	4.70	4.70	1.48	14.9	〃
12	5.0-B-O	5.0	〃	〃	2.40	7.6	4.34	4.34	1.95	13.8	〃
13	1.5-N-W	1.5	なし	あり	7.99	25.4	9.0	15.00	2.03	47.6	せん断圧縮
14	2.5-N-W	2.5	〃	〃	4.79	15.3	—	10.56	2.38	33.5	曲げ
15	1.5-B-W	1.5	あり	〃	7.99	25.4	7.0	13.60	1.84	43.2	せん断圧縮
16	2.5-B-W	2.5	〃	〃	4.79	15.3	—	12.20	2.75	38.7	曲げ

注：1) 記号は、(a/d の値)-(付着あり：B, 付着なし：N)-(腹部補強あり：W, 腹部補強なし：O)を表す。

2) 設計荷重は、便宜上引張主鉄筋の応力度が、計算上 1800 kg/cm^2 になるときの荷重とした。

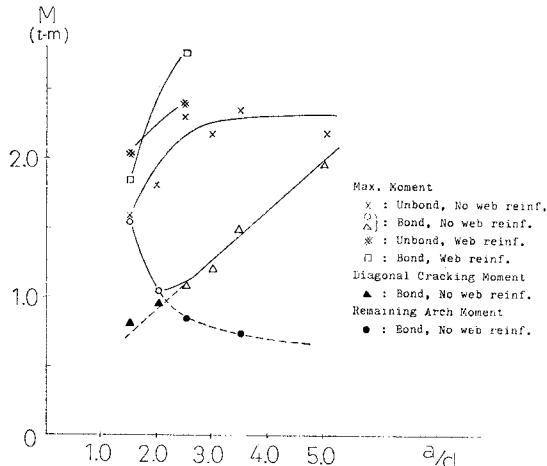


図-4 最大モーメントの図（実験値）

面部分で一種のせん断破壊の状態にあり、引張主鉄筋より上側のコンクリートがなんら害されることなく強固な残存アーチリブを形成し、はりの残存アーチ耐力を著しく高めているからである。

一方、付着がある場合には斜めひびわれ発生後、斜めひびわれより上側のコンクリートだけで残存アーチリブを形成するために、大きな耐力を保持することが困難なのである。なお、付着がない場合、曲げ引張破壊をしているにもかかわらず最大モーメントが断面のもつ本来の曲げ耐力より低いのは、鉄筋が支間全長にわたって同一の応力度となるため支間中央に発生した曲げひびわれが拡大し、この部分の断面で曲率が大きくなっていることによって上縁が早期に圧壊するからである。

図-6 に代表的な供試体の荷重-たわみの関係の実験結果を示す。この図から明らかなように、 a/d が 2.5 および 3.5 の例の場合には付着の有無により荷重-たわみ曲線で囲まれる面積、すなわち破壊までのエネルギーの吸収能力が 10 倍以上も異なり、付着の存在がきわめて脆性的な破壊状態をもたらすことを示している。 a/d が 2.5 と 3.5 とで比較すると 3.5 の方が斜め引張破壊後の残存アーチ耐力が小さく、破壊も急激である。一方、付着のない場合には初期の段階からたわみが大きいが、その勾配は鉄筋の降伏までほぼ直線であり、付着がある場合の斜め引張破壊後の残存アーチ状態における勾配とほぼ同じである。このことは、付着がない場合の耐荷機構が最初から残存アーチ機構の状態にあることを示すものであると考えられる。また、 a/d が 1.5 の場合では図-6 (a) に示されるように、付着

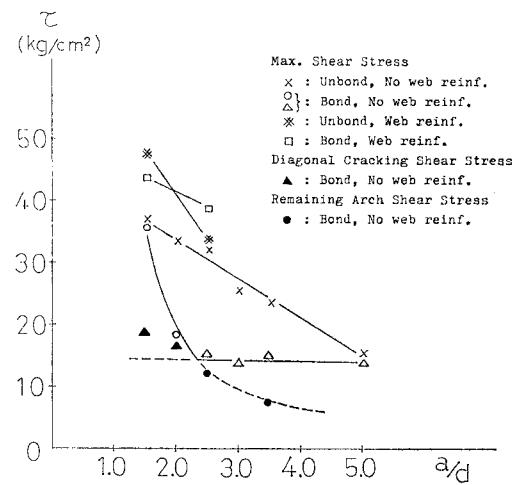
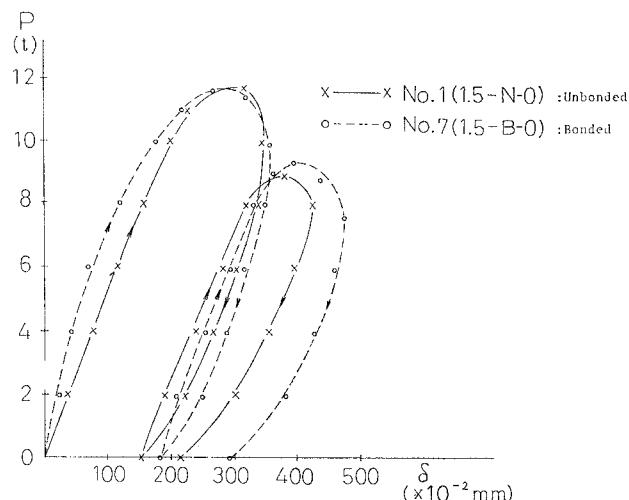
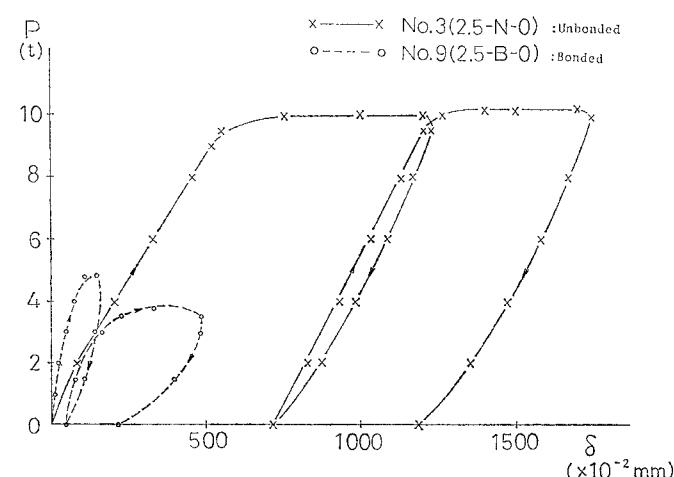
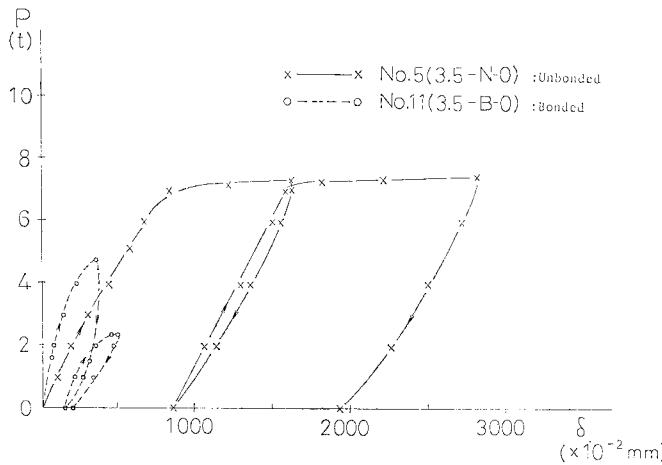


図-5 最大せん断応力度の図（実験値）

図-6 (a) $a/d=1.5$ の供試体の支間中央における荷重-たわみの実験値図-6 (b) $a/d=2.5$ の供試体の支間中央における荷重-たわみの実験値

図-6(c) $a/d=3.5$ の供試体の支間中央における荷重-たわみの実験値

の有無で a/d が 2.5 や 3.5 の場合のようにたわみ挙動に大きな相違がない。これは付着のある場合でも斜めひびわれ発生後の残存アーチ耐力が相当に大きいこと、付着のない場合の腹部の割裂ひびわれの形状が、付着のある場合の斜めひびわれとほぼ類似していること、などの原因によるものである。したがって、 a/d が 1.5 程度以下の場合には、付着の有無は腹部補強のないはりのせん断耐力にほとんど影響を与えないものと考えることができる。

次に付着のないはりにおける腹部補強の効果についてであるが、 a/d が 2.5 程度より大きい場合には、腹部に斜めひびわれが発生しないために腹部補強の効果は現われないことになる。しかし、 a/d が 2.0 程度以下の場合には腹部に割裂ひびわれが発生するために腹部補強によって終局耐力を増加させることができた。 a/d が 1.5 で腹部補強がなく、かつ、付着のない場合の終局耐力を 1.0 として比較すると、腹部補強がなく付着のある場合の耐力は 0.99、腹鉄筋比が 0.64% の腹部補強があつて付着のある場合の終局耐力は 1.16、同様の腹部補強があつて付着のない場合の終局耐力は 1.28 となって、腹部補強を行つても a/d が 1.5 の場合には付着のない方が終局耐力が大きくなっている。

以上に述べたように実験の条件をきわめて単純化して鉄筋の付着の影響を求めたところ、鉄筋コンクリートはりのせん断耐力と付着との関係についての基本的な現象が明確に把握できたものと思われる。

4. 有限要素法による解析

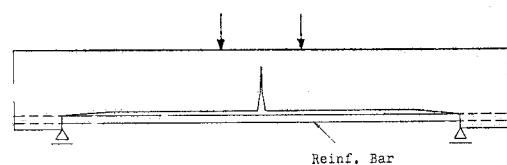
単純な実験条件によって鉄筋コンクリートはりのせん断耐力と付着の関係を求めたことと対応して、できるだけ明瞭に現象を把握するために単純なモデル化を図り、

有限要素法による弾性解析を行った。

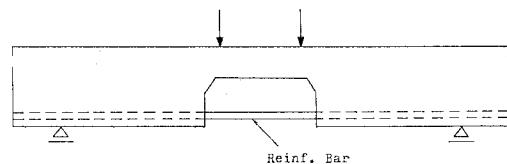
付着のない供試体のモデル化は、図-7(a)に示すように引張主鉄筋の下側のコンクリートを無視し、この鉄筋の上側のコンクリートと鉄筋との間を不連続にして付着の生じないようにした。

付着のある供試体の場合には、図-7(b), (c)に示すようにまず曲げひびわれ発生後の状態として曲げひびわれ部分の内側のコンクリートを取り除いたモデルを考え、次に斜めひびわれ発生後の状態として斜めひびわれの内側のコンクリートを取り除いたモデルとした。これらの場合のひびわれ位置は実験結果を参考にして定めた。

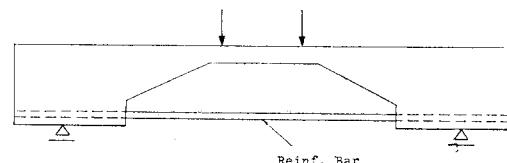
破壊の形態としては曲げ破壊、斜め引張破壊、せん断圧縮破壊（残存アーチ耐力）、割裂破壊の 4 つに限定した。ここで曲げ破壊荷重は、付着のない場合については載荷点近傍のコンクリート上縁の応力度がコンクリートの圧縮強度である 240 kg/cm^2 に達する荷重とし、付着のある場合には支間中央での鉄筋の引張応力度が降伏応力度に達する荷重とした。斜めひびわれ発生荷重は、曲げひびわれ発生後のモデルの支点と載荷点とを結ぶ線上で中立軸より下の腹部での主引張応力度が、コンクリートの引張強度である 24 kg/cm^2 に達する荷重とした。せん断圧縮破壊荷重は、斜めひびわれ発生後のモデルで載荷点近傍でのコンクリート要素の圧縮応力度



(a) Analytical model for unbonded specimen after flexural cracking



(b) Analytical model for bonded specimen after flexural cracking



(c) Analytical model for bonded specimen after diagonal cracking

図-7 有限要素法による解析のためのモデル化

表-4 有限要素法による破壊荷重の計算値と実験値

供試体 No.	有限要素法による計算値(単位:ton)			実験値(単位:ton)				破壊荷重の計算値 破壊荷重の実験値	
	曲げ	割裂または斜めひびわれ	せん断圧縮 ³⁾	曲げ	割裂または斜めひびわれ	せん断圧縮 ⁴⁾	破壊形態および最大耐力		
1 (1.5-N-O)	24.39	11.63	9.02	--	11.70	(8.95)	割裂	11.70	0.99
3 (2.5-N-O)	11.13	33.76	--	10.21	--	--	曲げ	10.21	1.09
5 (3.5-N-O)	8.11	34.70	--	7.45	--	--	曲げ	7.45	1.09
7 (1.5-B-O)	18.55	6.69	11.35	--	6.00	11.56	せん断圧縮 11.56		0.98
9 (2.5-B-O)	13.33	4.65	5.65	--	4.79	(3.78)	斜めひびわれ 4.79		1.18
11 (3.5-B-O)	8.67	4.25	3.40	--	4.70	(2.38)	斜めひびわれ 4.70		0.90

注: 1) 付着なしの供試体では、載荷点付近の圧縮応力度、付着ありの供試体では、支間中央での鉄筋の引張応力度から曲げ耐力を計算した。

2) 割裂(付着なしの供試体の場合)、および斜めひびわれ(付着ありの供試体の場合)では、載荷点と支点とを結ぶ線付近での引張応力度から耐力を計算した。

3) せん断圧縮耐力は、載荷点付近の圧縮応力度から計算した。

4) かっこで示した値は、はりが斜め引張または割裂で破壊した直後に保持していた残存アーチ耐力である。

がコンクリートの圧縮強度である 240 kg/cm^2 に達するときの荷重とした。割裂破壊荷重は、付着のないモデルにおいて中立軸付近のコンクリート腹部の主引張応力度がコンクリートの引張強度である 24 kg/cm^2 に達する荷重とした。なお、ここで主引張応力度の値は、あらかじめ定めた 2 つ以上の要素の主応力の平均値を用いている。このようにして腹鉄筋の配置されていない供試体のうち、 a/d が 1.5, 2.5, 3.5 について鉄筋の付着の有無を考慮して計算を行った。

表-4 に計算によって求められた各供試体の種々の破壊形態における破壊荷重を示す。また比較のため、この表には実験結果もあわせて示してある。なお、ここでこの表から終局破壊荷重を推定するには次のように考えることとした。すなわち、斜めひびわれ発生荷重または割裂破壊荷重と、残存アーチ耐力(すなわち、せん断圧縮破壊荷重)とを比較し、前者が大きい場合には斜めひびわれが発生しても破壊せざる後者によって破壊が支配される。曲げ引張破壊荷重については、斜めひびわれ発生荷重(または割裂破壊荷重)と残存アーチ耐力の両方またはいづれか一方より小さい場合に破壊形態を支配することになる。

このようにして計算した結果から各供試体の終局破壊荷重を算出すると、表-4 に示されるように破壊形態およびその場合の破壊荷重が実験結果のそれとよく一致していることがわかる。また、斜めひびわれ発生荷重や残存アーチ耐力についても計算値は実験値とよい一致を示している。図-8 および図-9 に表-4 の値から得られる最大モーメントおよび破壊時せん断力と a/d との関係を示す。これらの図から明らかのように単純にモデル化し有限要素法によって解析した結果は図-4 および

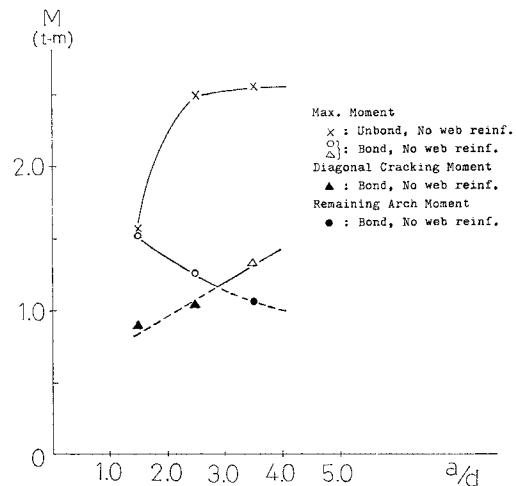


図-8 最大モーメントの図(有限要素法による解析値)

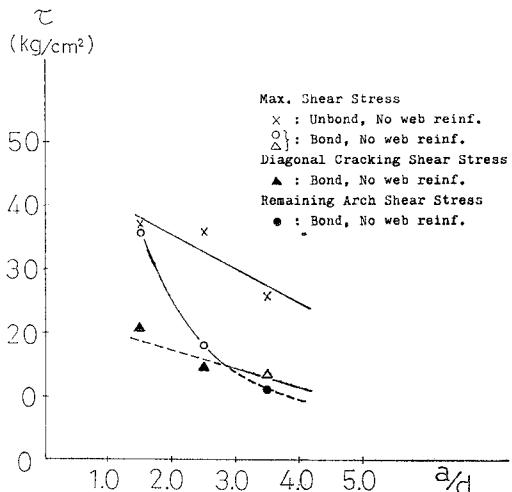


図-9 最大せん断応力度の図(有限要素法による解析値)

図-5 に示した実験結果とそれぞれ傾向がよく一致しており、このように単純化した解析でも鉄筋コンクリートはりの耐荷挙動をよく表現し得ることが明らかとなつたのである。また、この結果から、本研究における実験結果の妥当性も確認されたものと思われる。

5. 鉄筋定着部における付着の効果

前章までに述べた実験および解析の結果から鉄筋の付着は鉄筋コンクリートはりのせん断耐力にきわめて悪影響を与えることが示されたのであるが、一方、鉄筋の付着はひびわれ分散性や鉄筋の定着にとって不可欠の要素であると思われる。

ひびわれの分散性については図-3 で付着のない場合のひびわれ状況をみれば明らかなように付着が存在しなければ曲げひびわれの分散はまったく期待できず、しかも早期に曲げひびわれが進展し、ひびわれ幅が拡大するので鉄筋の耐久性を考えるうえで鉄筋の付着の重要なことは本実験からも当然のことといえる。

鉄筋の定着と付着の関係については鉄筋の定着が単に鉄筋表面での付着のみに依存しておらず多くの場合鉄筋端部にフックを設けているため、付着とフックとの複合効果として定着を考える必要があると思われる。そこで本研究では鉄筋の定着部の付着が一部除去された供試体を作製し鉄筋定着部における付着の効果について実験的検討を行った。供試体は a/d を 1.5, 2.5, 3.5 の 3 段階とし引張主鉄筋の両端部には直角フックを設け、フックの折曲げ位置から端まで（以下折曲げ部分とよぶ）の付着を残し、鉄筋の水平部分全長にわたりロウを塗って完全に付着を除去した。ここで直角フックの折曲げ部分の長さは 10 cm（約 8 ϕ , ϕ : 鉄筋直径）である。したがって、前章までの付着のない供試体と異なる点は鉄筋両端部において支点からフック折曲げ点までの間の約 10 cm（約 8 ϕ ）の長さの付着を除去であることおよび直角フック部分のみとしたこと、であって、供試体の寸法その他は前章までのものと同じである。

載荷実験の結果は、 a/d が 1.5, 2.5, 3.5 に対して破壊荷重はそれぞれ 7.0 t (11.7 t), 4.8 t (10.2 t), 3.4 t (7.5 t) であって、いざれも鉄筋定着部の不完全さによる鉄筋の定着部からの抜け出しによりはりが破壊した。ここでかっこ内の数値は定着部の付着が除去されていない場合の付着のない供試体の耐力であって、これと比べると直角フックの折曲げ部分だけの定着でははりの耐力が大幅に低下することが示されたのである。この耐力をモーメントで表わすとそれぞれ 0.94 t-m, 1.08 t-m, 1.08 t-m となってほぼ一定の値となっている。このことから鉄筋の定着強度はいずれの場合も鉄筋の引張応力

度に対応していることがわかる。この場合直角フックの折曲げ部分だけで定着できる鉄筋の引張応力度は抵抗モーメントを平均 1 t-m として算出すると約 1700 kg/cm² である。この簡単な実験によって、支点を越えてフックの折曲げ部分までのわずか 10 cm 程度の間の鉄筋の付着が鉄筋の定着にとってきわめて重要な役割を果たしていることが明らかになったのである。鉄筋の引抜き付着試験による異形鉄筋の付着強度は少なくとも 50 kg/cm² 以上は期待できるので⁸⁾、この値を用いて長さ 8 ϕ で定着できる鉄筋の引張応力度を求めるとき 1600 kg/cm² 以上であり、したがって折曲げ部分により定着できる 1700 kg/cm² とこの 1600 kg/cm² を加えれば 3300 kg/cm² 以上の引張応力度を定着できることとなり SD 30 クラスの鉄筋の定着としては十分であるといえる。ただし、このような場合でも安全な定着を確保するためには支点とフックとの間に十分な横方向鉄筋を配置することが必要である。以上に述べたように、異形鉄筋の直角フックは鉄筋の付着の定着への寄与を大幅に期待しているのである。

また、鉄筋の継手のうちで最も簡便で広く用いられている重ね継手は、異形鉄筋の場合フックを設げずその機能を完全に鉄筋の付着に依存しているので、たとえ付着が鉄筋コンクリートはりのせん断耐力に悪影響を与えるとしても鉄筋にはある程度の付着性能を保持させることがこの点からも必要である。

6. 考 察

異形鉄筋のように付着が良好な場合と、付着を完全に除去した場合とで腹部補強のない鉄筋コンクリートはりのせん断耐力は大きく異なることが明らかにされたが、実際には付着がその中間程度である普通丸鋼が用いられる場合もある。普通丸鋼を用いたはりの方が異形鉄筋を

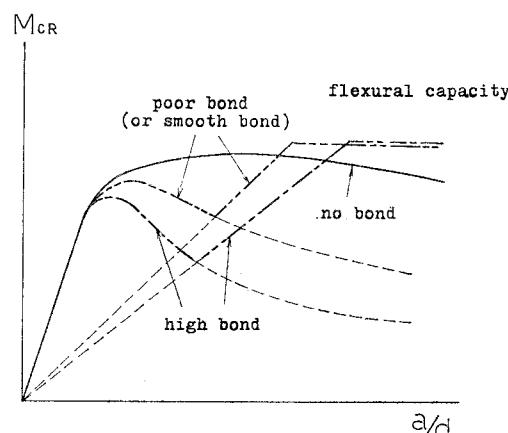


図-10 付着をパラメーターとしたはりの耐力の概念図

用いたはりよりもせん断耐力が大きいことは Kani の論文の中でも指摘されており¹⁾、これを本実験結果とあわせて考えれば鉄筋の付着性能をパラメーターとした、はりの耐力と a/d との関係図は、図-10 のような概念図で表現することができるものと思われる。すなわち、この図は斜め引張破壊耐力とせん断圧縮破壊または残存アーチ機構の耐力とを鉄筋とコンクリートとの付着の良否と関係付けて表わしたものであって、付着のまったくない場合と付着の良好な場合との曲線を描き付着が中間程度の場合には曲線がその中に位置するものとして付着の影響の連続性を考えたものである。この図で no bond の場合は載荷前から強固な残存アーチ機構を形成するため原点を通り a/d の増加とともに直線的に増加してからフラットになり a/d がさらに大きくなると徐々に減少する曲線となる。ここで曲線が原点を通るのは縦軸がせん断力 $\times a$ であり、原点では $a=0$ であるからである。high bond すなわち付着が良好な場合の曲線は、 a/d が小さい場合は付着の有無の影響が小さいので no bond の場合と同じ曲線となるが、 a/d が大きくなると図-1 に示されるような右下りの曲線となる。同様にして斜め引張破壊の線については原点から立ち上がる no bond の線と high bond の線とが描かれ、その中に付着が中間程度の場合の線が原点を通って描かれる。なお、この図で high bond とは、異形鉄筋表面のふし高が大きく、鉄筋の付着応力度が大きい場合に該当し、ふし部分から発生する内部ひびわれが容易に斜めひびわれに成長することに対応させている。また、poor bond (または smooth bond) とは、普通丸鋼のように表面が滑らかでスムーズな付着力の伝達が行える場合に該当し、斜め引張破壊および残存アーチの耐力を向上させることになる。したがって、適当な細径の異形鉄筋を配置すれば太径の鉄筋を同面積で数少なく配置するより付着応力度も小さくなつてスムーズな付着が期待できるので、はりのせん断耐力を増大させることにつながるものと思われる。Leonhardt が付着の良好なことがはりのせん断耐力を高めると報告しているが³⁾、これはこの点に着目して付着を評価したからだと思われ、この概念図の考え方により、付着とせん断耐力との関係が統一的に説明できるようになったのである。

鉄筋の付着はいわば両刃の剣であつて、せん断と定着あるいはひびわれ分散性とを同時に満足させることは困難であると思われるが、今後異形鉄筋の表面形状を検討する場合、定着強度の許す範囲で滑らかな付着が行えるように工夫するのがよいであろう。

また、付着によるせん断耐力への悪影響は、腹鉄筋の配置によって十分に補うことができるので、一般に実用上は鉄筋の付着による悪影響を回避することができる

が、地震力のような高応力正負繰返しの荷重が作用する場合には普通丸鋼を用いた部材の方が韌性が大きいとの大野らの報告もあり⁷⁾、鉄筋の付着性能の評価についてはこの点の検討が必要である。

付着とせん断との関係を扱った研究としては Swamy ら⁴⁾の報告もあるが、供試体の多くが定着部または支承部の強度が十分でないために付着のない場合に到達するはずの最大耐力に至ることができなかつたようであり、そのために鉄筋の付着がはりのせん断耐荷挙動に及ぼす影響についての評価が本研究の結果と相当に異なつてゐるのだと思われる。また、せん断耐力が桁高に大きく影響されるとした Kani の研究⁸⁾は、用いた供試体の形状から考えて鉄筋の付着の影響が相當に含まれているものと思われ、鉄筋の配置方法やかぶり等も部材のせん断耐荷挙動と付着との関係の中で考慮する必要性のあることを示しているものと思われる。

7. 結 論

鉄筋コンクリート部材のせん断耐荷機構は多くの要因に影響するためにいまだ十分に解明されておらず、特に鉄筋の付着が鉄筋コンクリート部材のせん断耐荷挙動に及ぼす影響については、それが鉄筋コンクリートの基本的な問題であるにもかかわらず、必ずしも明らかにされていなかつた。本研究は、この問題について基本的な点から解明を試みたものであつて、実験的および解析的な研究によって次のようなことが明らかにされたのである。

(1) 鉄筋コンクリート単純はりにおいて引張主鉄筋の付着がなく、かつ、両端で十分に定着されているならば、せん断支間桁高比 a/d が特に小さくない限り腹部に斜めひびわれが発生せず、したがつて、せん断によつてはりが破壊することはない。この場合の破壊は強固なアーチリブをもつ残存アーチ機構により、支間中央部分における曲げ引張破壊の形態となり十分に粘りのある挙動を示す。付着があり、かつ、腹部補強のない鉄筋コンクリートはりのせん断耐力について、縦軸に破壊時の最大曲げモーメント、横軸に a/d をとって表現すると、 a/d が 2.5 附近で谷底となるような V 形の谷部を示すことが一般によく知られているが、鉄筋の付着がない場合にはこの谷部がまったく存在しないのである。このため本研究の実験の例では a/d が 2.5 の場合、鉄筋の付着がない方が付着がある場合より約 2 倍もはりの耐力が大きく、かつ、破壊に至るまでのエネルギー吸収量が 10 倍以上も大きくなつたのである。このことから腹部補強のない鉄筋コンクリートはりでは、鉄筋の付着がはりのせん断耐力にきわめて大きな悪影響を与えることが

明確にされたのである。

(2) 付着のないはりで a/d が比較的小さい場合には、載荷点と支点とを結ぶ線に沿った割裂破壊が生じ、これがはりの終局耐力を決定することがある。この場合には腹部補強をすればこれが有効に働きはりの耐力を高めることができる。

(3) はりの破壊の形態を、斜め引張破壊、せん断圧縮破壊、割裂破壊、および曲げ破壊、の4つに分類し、単純なモデル化を行って有限要素法による解析を行った結果、解析的に腹鉄筋のない鉄筋コンクリートはりのせん断破壊の形態とその耐力をきわめてよく表現し得ることが明らかとなった。

(4) 簡単な鉄筋定着部の実験から、鉄筋端部付近における鉄筋の付着が鉄筋の定着にきわめて重要な役割を果たしていることが明らかにされた。異形鉄筋の重ね継手がその機構のすべてを鉄筋の付着によっていることおよびひびわれの分散性の問題等を考えあわせれば、単にせん断にだけ着目して鉄筋の付着性能を大幅に低下させることは必ずしも得策とはならないと思われる。

(5) 付着をパラメーターとしたはりの耐力の概念図を提案することにより、付着が劣っている方がせん断耐力を向上させるという Kani の説と、付着の良好な方がよいとの Leonhardt の考えとが矛盾なく説明でき、付着とせん断耐力との関係が統一的に表わせることが示された。

(6) 以上に述べた研究成果から、通常用いられているような付着の良好な異形鉄筋の場合と、付着のまったくない鉄筋の場合とで、鉄筋コンクリートはりのせん断耐力は大幅に異なることが明らかとなったが、普通丸鋼のように付着が貧弱な場合には、付着の概念図に示されるようにせん断耐力もその中間に位置するものと思われる。これは付着がスムーズにコンクリートに伝達されコンクリートに内部ひびわれ等の損傷を与えるにくいことが理由として掲げられる。このことは太径の異形鉄筋を数少なく配置するよりも適当な細径の異形鉄筋を同面積配置する方がスムーズな付着力の伝達が行われることによ

り、はりのせん断耐力を向上させることにつながるものと思われる。今後、異形鉄筋の表面形状を改良する場合には定着強度の許す範囲で滑らかな付着が行えるよう工夫することが必要であろう。これにより、鉄筋コンクリート部材の耐震性の向上をも図れるものと思われる。

謝 辞：本研究を行うにあたり種々ご協力いただいた信田佳延氏（現・鹿島建設）をはじめとする東京都立大学土木材料学研究室の学生諸氏および助手の方々に厚く御礼を申し上げる。また、本研究は昭和52年度および53年度に交付された文部省科学研究費補助金（一般研究C）No. 255180による研究成果の一部であることを付記し、関係各位に謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) Kani, G.N.J. : The Riddle of Shear Failure and Its Solution, Journal of the American Concrete Institute, No. 61-28, pp. 441~467, April 1964. (この論文に対する多数の討議が同誌 1964年12月号に掲載されている)
- 2) Leonhardt, F. and R. Walther : Contributions to the Treatment of the Problems of Shear in Reinforced Concrete Construction, Translation No. 111, Cement and Concrete Association, London, 1964.
- 3) Leonhardt, F. : コンクリート構造物におけるせん断に関する諸問題(上), 橋梁と基礎, Vol. 11, No. 4, 1977年4月号。
- 4) Swamy, R.N., A. Andriopoulos and D. Adepegbajo : Arch Action and Bond in Concrete Shear Failures, Proc. ASCE ST 6, pp. 1069~1091, June, 1970.
- 5) 池田尚治・宇治公隆：鉄筋コンクリートはりの残存アーチ機構について、土木学会第33回年次学術講演会講演概要集第5部, V-141, 1978年9月。
- 6) 池田尚治・鈴木 昭：鉄筋の付着試験方法に関する研究、土木学会第33回年次学術講演会講演概要集第5部, V-187, 1978年9月。
- 7) 大野和男・柴田拓二・服部高重：曲げとせん断の動的繰返を受ける鉄筋コンクリート梁の耐力に関する研究(軸鉄筋の付着性能の影響)，文部省科学研究費補助金特定研究，複合材料第五次研究成果報告書，pp. 255~264, 昭和50年6月。
- 8) Kani, G.N.J. : How Safe Are Our Large Reinforced Concrete Beams?, Journal of the American Concrete Institute, No. 64-12, pp. 128~141, March, 1967.

(1979.1.18・受付)