

論文 高強度 RC はりのせん断抵抗性状および付着割裂破壊との関連性

松野 一成^{*1}・角 徹三^{*2}・Agussalim^{*3}・松井 洋和^{*4}

要旨：本論文は、高強度コンクリートを用いた鉄筋コンクリート部材のせん断抵抗性状を明確にするために行われた実験結果の検討であり、付着割裂破壊との関連性および、せん断力を受ける部材の主筋に作用する引張力増加について言及している。その結果、主筋の引張力が増加することにより主筋の応力分布に影響を与え、応力が圧縮側へ移行する付近の付着応力度の上昇につながる事が確認された。また、引張力の増分を試験体間で比較することで、試験体の破壊モードがせん断破壊から付着割裂破壊へと移行する様相をとらえた。

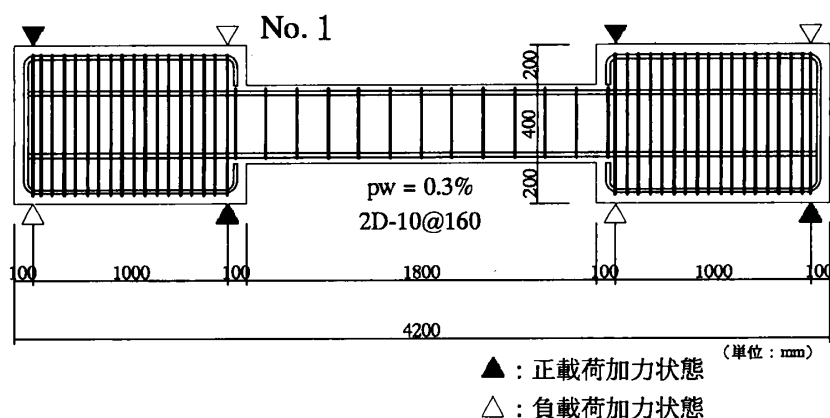
キーワード：せん断破壊，付着割裂破壊，横補強筋量，主筋応力分布

1. はじめに

1988年にリミット・アナリシスに基づくせん断設計式が建築学会において提案された後[1]、New RC プロジェクト等でコンクリート強度が $\sigma_c = 1,200 \text{ kgf/cm}^2$ レベルまでもに適応可能なように修正が加えられた[2]。しかしこれらを裏付けるための高強度コンクリートを用いたRC部材のせん断破壊試験は必ずしも十分とはいえない。さらに、せん断破壊と同様、脆性的破壊を呈する付着割裂破壊との関連性も明らかにすべき課題である。本研究は、横補強筋量のみを実験変数とした $\sigma_c = 1,200 \text{ kgf/cm}^2$ レベルのRC部材のせん断破壊試験を行い、せん断抵抗性状を明らかにするとともに、付着割裂破壊とせん断破壊の境界域について考察を加え、両者の関連性を明確にすることを目的としている。なお、本論文中のせん断補強筋は付着問題との関連性から横補強筋という呼称で統一した。

2. 実験概要

実験は横補強筋比のみをパラメータとする5体の試験体を用いて行われた。図—1に試験体の典型例を示す。また、試験体の詳細については実験結果の概要と並記して表—1に示す。実験は図—1中に示すように正負交番載荷とした。なお、実験の詳細については



図—1 試験体図

- * 1 呉工業高等専門学校助手 建築学科、工修（正会員）
- * 2 豊橋技術科学大学教授 建設工学系、工博（正会員）
- * 3 豊橋技術科学大学大学院 博士課程 工学研究科建設工学専攻（正会員）
- * 4 豊橋技術科学大学大学院 修士課程 工学研究科建設工学専攻

表—1 実験結果の概要

	断面形状 (cm)	主筋 本数・径	横補強筋			目標コン クリート 強度 (kgf/cm ²)	コンク リート 実強度 (kgf/cm ²)	実験値				計算値		破壊 モード
			本数・径・ ピッチ	横補強筋 比 (%)	降伏応力度 (kgf/cm ²)			正載荷		負載荷		New RC式*1 による せん断力 Qs(tonf)	角・張式*2 から算定 される せん断力 Qb(tonf)	
								最大 せん断力 (tonf)	部材 変形角 (*10 ⁻² rad)	最大 せん断力 (tonf)	部材 変形角 (*10 ⁻² rad)			
No.1	30*40	4-D25 pt=pc =1.89%	2-D10@160mm	0.3	3600	1000	1220	33.90	0.735	-27.23	-0.604	41.00	44.38	せん断
No.2			2-D10@120mm	0.4				35.90	0.872	-37.70	-0.889	46.56	48.75	せん断
No.3			2-D10@80mm	0.6				51.31	1.638	-41.12	-0.847	57.67	57.19	せん断
No.4			2-D10@60mm	0.8			1170	49.64	1.434	-59.71	-1.453	68.81	65.36	付着
No.5			2-D10@50mm	1.0				62.88	1.743	-60.06	-1.350	79.94	73.36	付着

* 1 有効強度算定に次式を用いる。[2]

$$\nu_0 \cdot \sigma_B = 3.6 \cdot \sigma_B^{0.667}$$

* 2 せん断力算定は文献[3],[4]による。

文献[4]に示されていると
おりである。

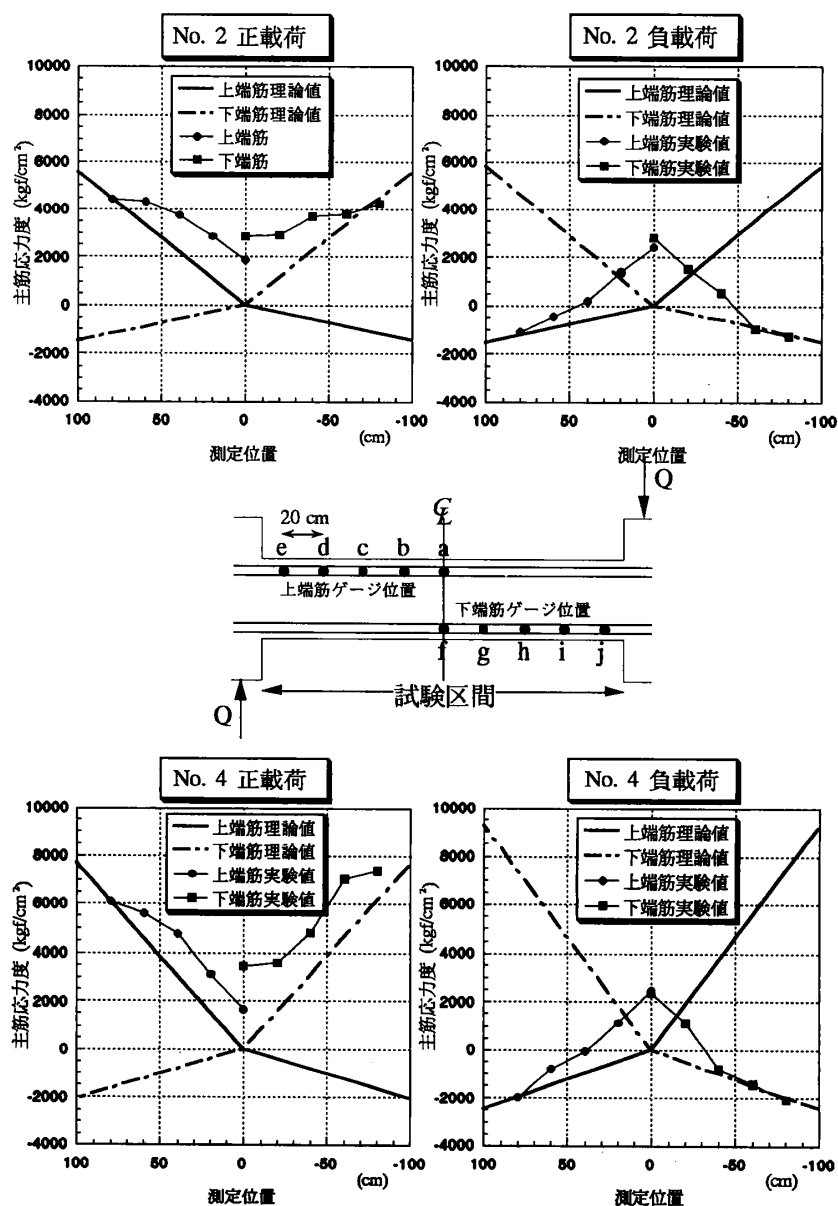
3. 実験結果および 考察

3. 1 実験結果の概要

表—1 に実験結果の概要を示す。すべての試験体において試験体材令が80日以上を経過したためコンクリート実強度は目標強度を大幅に上回った。正載荷ではNo.3 ($p_w=0.6\%$) の最大せん断力がNo.4 ($p_w=0.8\%$) のそれをほんの少し上回り、負載荷ではNo.4 ($p_w=0.8\%$) とNo.5 ($p_w=1.0\%$) の最大せん断力がほとんど等しいことを除けば横補強筋量 (p_w) の増大とともに最大せん断力も増大する。最大せん断力時の部材変形角についても最大せん断力の増大の様相と同様のことがいえる。

3. 2 主筋の応力分布

図—2 に正載荷、負載荷それぞれの最大せん断力時の主筋の応力分布図を示す。図中の実線、1点鎖線



図—2 主筋の応力分布

は平面保持の仮定により算出した主筋応力の計算値の分布である。正載荷においては上端、下端筋とも引張応力を受けるため、図中の実践、1点鎖線とも引張応力の分布のみ対象となる。また、負載荷においてはその逆となり圧縮応力の分布のみ対象となる。No.4 ($p_w=0.8\%$) における正載荷と負載荷の計算値の極端な差は、最大せん断力が正負で大きく異なるために生じているものである。この図においては、試験体に逆対称の荷重を加えていることもあり、上端筋、下端筋の応力分布に大きな差は見受けられない。試験体の中央部（曲げモーメントが0）に注目すると、上端、下端の主筋に引張応力が働いていることが分かる。これが応力分布の特徴として挙げられる。実験による応力の分布曲線を計算値と比較すると、引張側での勾配が緩やかで、圧縮側に応力が移行する付近での勾配がきつくなるという計算値とは逆の様相を示すことが明確に表れている。しかし、部材端に近づくにつれ、計算値の分布に適合してくるようになる。これらの現象は、主筋の引張力増分と関連づけて考えられるため、3. 4 最大せん断力時の主筋引張力において詳しく述べる。

3. 3 最大せん断力時の主筋の付着応力度

図—3は正載荷、負載荷それぞれの最大せん断力時の各主筋ごとの付着応力度をプロットしたものである。図中の実線は著者らが提案した以下の角・張による付着割裂強度式で算出した付着強度である[3]。

$$\tau_{bu} = [0.55 + 0.18b_i + k_n(q \cdot b_i + 18.2 \cdot p_w \cdot b / (N \cdot d_b))] \sqrt{\sigma_B} \quad (1)$$

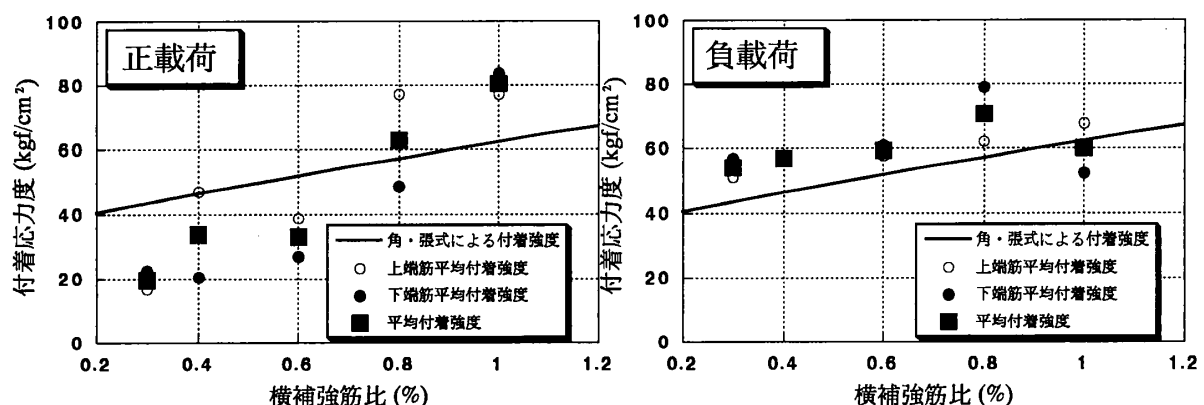
$$\text{ここで、} b_i : \text{主筋間コンクリートの効果係数} = (b - N \cdot d_b) / (N \cdot d_b) \quad (2)$$

$$k_n : \text{副帯筋の効果係数} = 1.0 + 0.84 \cdot n / N \quad (3)$$

$$q : \text{付着長さの影響係数} = (2.5 + 875 \cdot p_w) / (l_b / d_b + 7000 \cdot p_w) \quad (4)$$

但し、 τ_{bu} ：付着割裂強度(kgf/cm²)、 σ_B ：コンクリート強度(kgf/cm²)、 b ：部材幅(cm)、 N ：主筋本数、 d_b ：主筋径(cm)、 n ：一組の横補強筋の足数、 $p_w = A_{st} / (b \cdot s)$ ：横補強筋比、 A_{st} ：一組の横補強筋の断面積(cm²)、 s ：横補強筋間隔(cm)

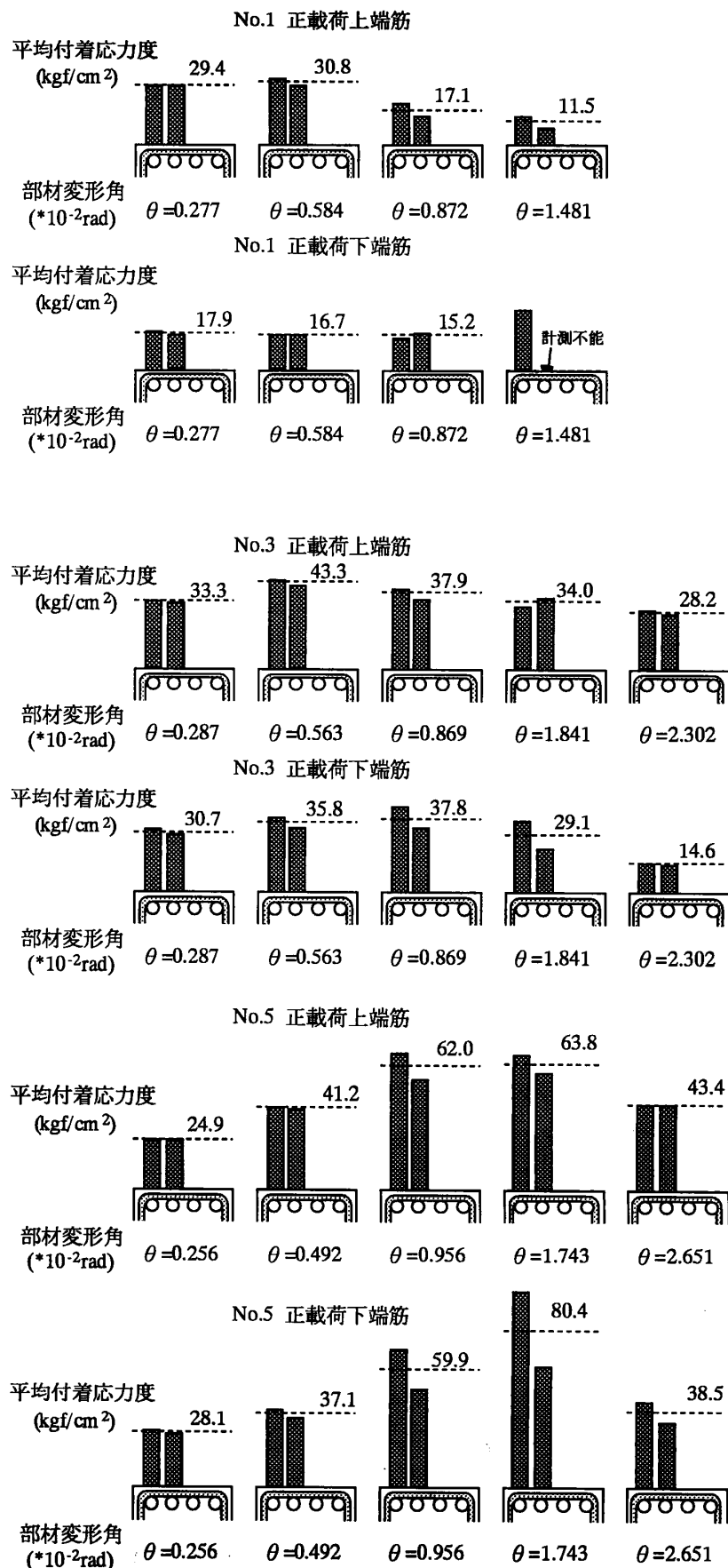
正載荷の主筋の付着応力度は、文献[4]のようにはりせいの長さ分だけ付着応力度がないものとして角・張式の付着長さを算定しているため、実験による付着応力度算定に際し、上端筋では図—2のa, b, cの3カ所、下端筋ではf, g, hの3カ所の主筋応力の勾配から実験による付着応力



図—3 付着強度—横補強筋比関係

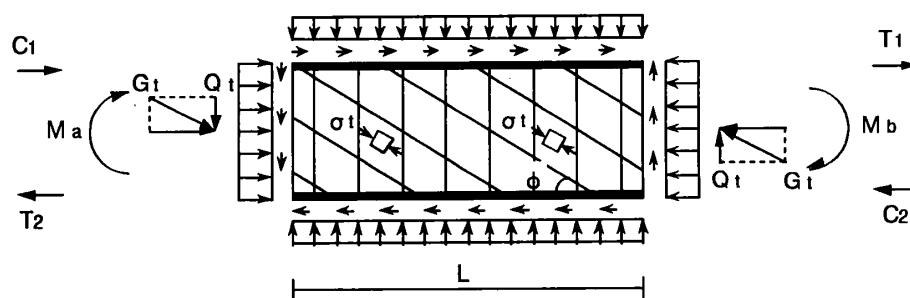
度を算定している。これは、計算時と実験時の付着長さを同じものとして扱うための配慮である。これと同様に、負荷荷の場合も正載荷と同じ視点で考察を加えるため、同位置の3カ所の応力勾配から算定している。図—3をみると、正載荷においてはせん断破壊をしたNo.1 ($p_w=0.3\%$) ~ No.3 ($p_w=0.6\%$) までは角・張式の数値を下回っている。これに対し、付着割裂破壊をしたNo.4 ($p_w=0.8\%$)、No.5 ($p_w=1.0\%$) はその数値を上回っている。しかし、負荷荷ではNo.5 ($p_w=1.0\%$) がほんの少し計算値を下回ることが除けば角・張式の数値を上回っている。図—2をみると分かるように、主筋の応力勾配は応力が引張から圧縮へ移行する付近で勾配がきつくなっている。負荷荷ではこの付近で付着応力を算定している。この現象が負荷荷での主筋の付着応力を上昇させた原因である。これらの応力状態を考慮すれば、付着割裂破壊をした試験体の付着割裂強度は角・張式から算定できると考えてよいであろう。

図—4はそれぞれの試験体の隅角筋と中間筋の付着応力度の差を部材変形角の進行ごとに表わしたものである。(図中の上端筋、下端筋ともに先に説明した、



図—4 付着強度の推移

3カ所の主筋応力の
勾配から付着応力度
を算出している。)
これをみると、せん
断破壊をしたNo. 3
($p_w=0.6\%$) の隅角筋
と中間筋の強度差が
若干大きくなってい
るものの、No. 1
($p_w=0.3\%$) とNo. 3



図—5 RC部材の応力釣合作用

($p_w=0.6\%$) には両者に大きな強度差は見受けられない。これに対し、付着割裂破壊をしたNo.5では部材変形角の進行とともに両者の強度差が大きくなる。特に負載荷においてはその差が顕著に表れている。これは横補強筋量の増大により隅角筋への拘束力が向上し、付着応力度を飛躍的に高めているためだと考えられる。またNo.5 ($p_w=1.0\%$) では最大せん断力を示した部材変形角以後の付着応力度には格段に強度が減少するという変化が表われているが、No.1 ($p_w=0.3\%$)、No.3 ($p_w=0.6\%$) には明確な強度減少は表われていない。この結果からも文献[4]で述べた破壊モードが不明瞭だった点の裏付けができる。

3. 4 最大せん断力時の主筋引張力

図—5の周知のトラス理論より、部材端の引張力と圧縮力は次式で与えられる[5]。

$$T_1 = M_b / j + Q_1 / 2 \cdot \cot \phi - N / 2 \quad (5)$$

$$T_2 = M_a / j + Q_1 / 2 \cdot \cot \phi - N / 2 \quad (6)$$

$$C_1 = M_a / j - Q_1 / 2 \cdot \cot \phi + N / 2 \quad (7)$$

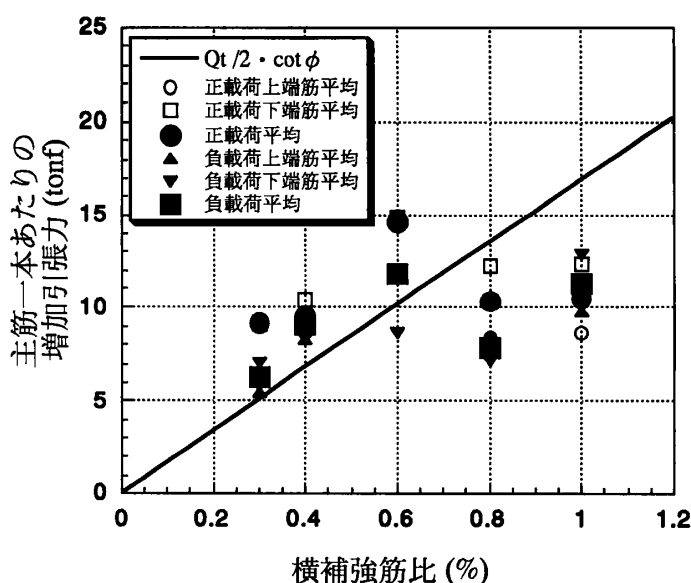
$$C_2 = M_b / j - Q_1 / 2 \cdot \cot \phi + N / 2 \quad (8)$$

但し、 T_1, T_2 ：部材端の主筋引張力(tonf)、 C_1, C_2 ：部材端の主筋圧縮力(tonf)、 M_a, M_b ：部材端の曲げモーメント(tonf・m)、 j ：応力中心間距離(cm)、 Q_1 ：部材に作用するせん断力(tonf)、 N ：部材に作用する軸方向力(tonf)

この式によるとせん断力を受ける鉄筋コンクリート部材は曲げモーメントが生じない断面（本実験の場合はすべての試験体において部材中央部となる）においても主筋には $Q_1 / 2 \cdot \cot \phi$ 分の引張力が生じることとなっている。その値と一致するかどうかは別として、図—2をみると曲げモーメントの生じない部材中央部にはっきりと引張応力が加わっていることが分かる。しかし、(5)～(8)式をみると、この増分は任意の位置でも一定であるはずであるが、図—2をみる限りでは必ずしも一定ではない。むしろ部材端では計算値に近づく傾向を示している。これより主筋の引張力の増分は試験体の中央部のみに作用し、部材端部にはあまり影響を与えないことが分かる。

図—6は正載荷、負載荷それぞれの最大せん断力時の主筋の応力から1本あたりの引張力を算出し、実験による主筋引張力との差をプロットしたもので、図中の直線はトラス作用のみの主筋の引張力増加を表したものである。抽出したデータは部材端部に引張力増分の影響が少ないことを考慮して正載荷の場合は、試験区間中央部よりの3カ所の測点のみである。また、負載荷においても、正載荷と同じ条件で比較検討を行うため、同じ測点のデータのみを抽出した。せん断破

壊した試験体の主筋の引張力の増加と、付着割裂破壊した試験体のそれとを比較すると明確な違いが表れている。トラス作用のみ考慮した引張力増分以上に引張力が増加しているとせん断破壊、そうでなければ付着割裂破壊を呈している。このことから、主筋引張力の変化の様相は、せん断破壊から付着割裂破壊への破壊モードの移行の様相をとらえているとみて良さそうである。



図—6 主筋引張力の増分

4. まとめ

横補強筋量のみを実験変数としたR C部材のせん断実験より得られた知見をまとめると以下の通りである。

1. 主筋の応力勾配は、引張側で勾配が緩やかとなり、圧縮側できつくなり、圧縮側での付着応力度の数値を上昇させる。
2. 横補強筋量の増大は、隅角筋の付着応力度上昇に効果があり、補強筋量が増大するにつれ中間筋との付着応力度差が明確となる。
3. 付着割裂破壊をした試験体の最大耐力以後の付着応力度は、格段に減少する。これはせん断破壊を呈した試験体には表れない。
4. 主筋に引張力の増分の様相から、せん断破壊から付着割裂破壊への破壊モードの変化をとらえることができた。

本実験にあたっては熊谷組の加力装置を使用した。コンクリート打設には竹本油脂、小野田レミコン豊橋工場のご協力をいただいた。本実験の遂行にあたり服部覚志氏（五洋建設）、吉村美治氏（鴻池組）の献身的な協力をいただいた。ここに心からの謝意を表する。

参考文献

- [1]日本建築学会：鉄筋コンクリート造構造物の終局強度型耐震設計指針・同解説、pp.112-124、1990
- [2]建設省 New RC プロジェクト：平成4年度構造性能分科会報告書、pp.V-1-V-9、1993
- [3]角徹三・服部覚志・松野一成：サイドスプリット型付着割裂破壊をするRC部材の付着強度式、日本建築学会大会学術講演梗概集（関東）C構造II、pp.225-226、1993
- [4]松野一成・角徹三：正負繰返し荷重を受ける高強度RCはりのせん断抵抗性状、コンクリート工学年次論文報告集第16巻第2号、p.p.497-502、1994
- [5]市之瀬敏勝・青山博之他：鉄筋コンクリート梁柱部材のせん断設計法（その1）トラス作用とアーチ作用、日本建築学会東海支部研究報告集、p.p.137-141、1988