

論文

[2023] 付着割裂強度に及ぼす主筋本数と横補強筋の効果

正会員 市之瀬敏勝 (名古屋工業大学社会開発工学科)

同 ○横尾 慎一 (名古屋工業大学大学院)

同 南 宏一 (福山大学建築学科)

1. はじめに

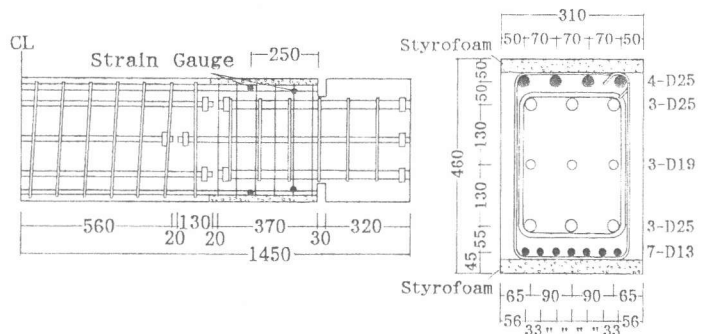
鉄筋コンクリート部材の強度と変形能力を確保するためには、曲げ破壊、せん断破壊と共に、付着割裂破壊を考慮する必要がある。藤井・森田[1] は、部材中の主筋の付着割裂強度を調べるための体系的な実験を片持ち梁形式で行い、付着割裂強度算定式を提案した。この成果は、日本建築学会「鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説」[2] に生かされている。その後、角・山田ら[3] は、単純梁形式で付着割裂強度を調べる実験を行った。しかし、主筋本数・中子筋など、付着破壊に及ぼす影響因子は数多く複雑で、不明な点がなお多い。著者らは、角・山田ら[3] と同じく単純梁形式で若干の付着割裂実験を行ったので、ここに報告する。

2. 実験概要

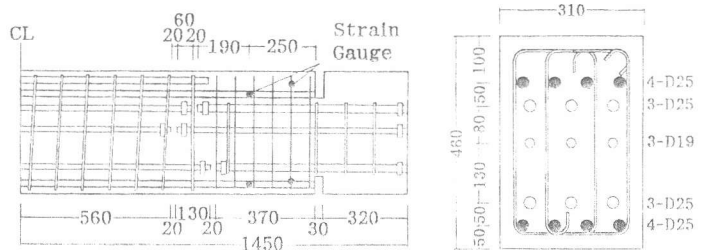
2.1 試験体

試験体は4体であり、配筋例を図1～4に示す。各試験体には試験部分が4カ所あり、それぞれの特徴および指針[2] による計算値を表1に示す。表中、試験体名称の末尾記号cは、かぶりコンクリートを意図的に取り除いた試験部分を表す。これは、高強度・高軸力の柱でかぶりが早い段階で剝離しやすい状況を考慮している。

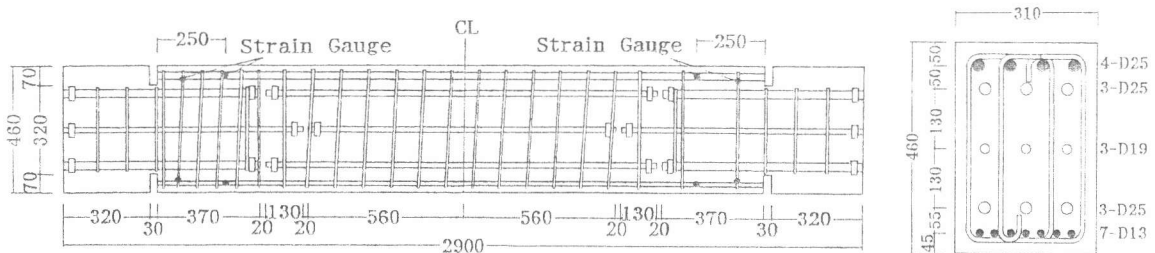
断面図に○で示した「補助鉄筋」とは、余分な曲げひび割れ・せん断



(a)側面 (N 4 L c, N 7 L c) (b)試験部分の断面
図1 試験体Aの配筋 (右半分) [単位:mm]



(a)側面 (N 4 M d, N 4 M) (b)試験部分の断面
図2 試験体Bの配筋 (右半分) [単位:mm]



(a)側面 (N 4 S, N 4 H, N 7 S, N 7 H) (b)試験部分の断面
図3 試験体Cの配筋 (断面図で、●は試験鉄筋、○は補助鉄筋) [単位:mm]

表1 試験体一覧表

試験部分 名称	試験 体名	載荷 順序	主筋		あばら筋				備考	τ (kgf/cm ²)		実/計
			本数 (本)	径 (mm)	足数 (本)	径 (mm)	間隔 (mm)	Pw (%)		計算値	実験値	
N 4 L	D	2	4	25	2	6	70	0.26	—	28.0	31.7	1.13
N 4 L c	A	3	4	25	2	6	70	0.26	かぶりなし	28.0	31.2	1.11
N 4 M	B	1	4	25	4	6	70	0.52	—	30.9	46.9	1.52
N 4 M'	B	4	4	25	4	6	70	0.52	N 4 Mと同じ	30.9	48.4	1.57
N 4 M c	A	4	4	25	4	6	70	0.52	かぶりなし	30.9	41.7	1.35
N 4 M o	D	1	4	25	4	6	70	0.52	45°補強	30.9	48.9	1.58
N 4 M d	B	3	4	25	4	6	70	0.52	二段目のみ	30.9	51.4	1.66
N 4 S	C	1	4	25	4	10	195	0.52	—	30.9	38.7	1.25
N 4 H	C	2	4	25	4	10	70	1.45	肋筋スパイラル	43.6	62.9	1.44
N 7 L	D	4	7	13	2	6	70	0.26	—	31.4	33.0	1.05
N 7 L c	A	2	7	13	2	6	70	0.26	かぶりなし	31.4	26.1	0.83
N 7 M	D	3	7	13	4	6	70	0.52	—	36.1	37.1	1.03
N 7 M c	A	1	7	13	4	6	70	0.52	かぶりなし	36.1	32.6	0.90
N 7 S	C	4	7	13	4	10	195	0.52	—	36.1	34.7	0.96
N 7 H	C	3	7	13	4	10	70	1.45	肋筋スパイラル	54.3	50.1	0.92
N 8 M	B	2	8	25	4	6	70	0.52	二段配筋	30.9	25.9	0.84

(注1) pwの計算に際し、あばら筋1本の断面積は、あばら筋の表面形状がインデント型で丸鋼に近いことを考慮して、異形鉄筋の公称断面積ではなく $\pi d_b^2/4$ (d_b :公称直径)とした。

(注2)
 N 4 L c $\left\{ \begin{array}{l} \text{横補強筋} \\ \text{備考} \end{array} \right.$
 主筋本数 $\left\{ \begin{array}{l} L : p_w=0.26\% \text{ (低)} \\ M : p_w=0.52\% \text{ (中)} \\ H : p_w=1.45\% \text{ (高)} \\ S : p_w=0.52\% \text{ (粗)} \end{array} \right.$
 $\left\{ \begin{array}{l} c : \text{かぶりなし} \\ o : 45^\circ \text{補強} \\ d : \text{二段目のみ} \end{array} \right.$

ひび割れを防ぎ、典型的な付着破壊を実現するために配した鉄筋である。補助鉄筋の端部には、図5のような鉄板を溶接し、定着を確実にした。

試験鉄筋と横補強筋の詳細を図6に示す。試験鉄筋は、同図のようにリブの方向をそろえて配筋した。中子筋は施工を容易にするため、90°と180°フックの組み合わせとした。

鉄筋の降伏強度とふし形状を表2に示す。コンクリートの配合と強度を表3に示す。コンクリートは、試験部分により上端筋・下端筋の区別が表れないように、試験体の横方向から打設した(断面図で、左→右)。実験時の材令は40~47日であり、圧縮試験は9体、割裂試験は4体のシリンダー強度の平均値とした。圧縮試験用のシリンダーの加圧面はキャッピングせず、研磨仕上げとした。

2.2 計測方法

試験鉄筋及びあばら筋の歪は、図1~4の側面図、図6の詳細図に示す位置に貼付した歪ゲージにより測定した。また、図7に示すように、

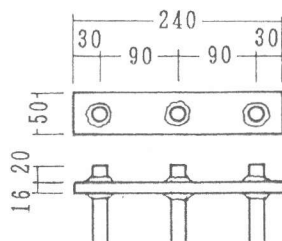
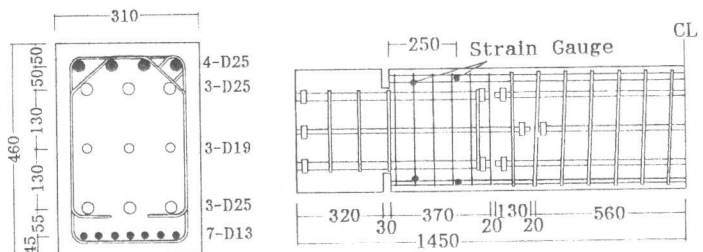
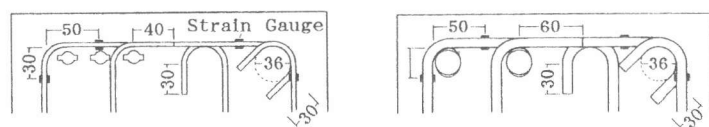


図5 補助鉄筋の定着板[単位:mm]



(a)試験部分の断面 (b)側面(N 4 M o, N 7 L)

図4 試験体Dの配筋(左半分)[単位:mm]



(a) N 7 M

(b) N 4 S

図6 断面詳細[単位:mm]

試験部分の端から 125mm の位置（試験区間の中間地点）で試験鉄筋とコンクリートの変位を測定し、その差を試験鉄筋のすべり量とした。これは、試験部分より外側のスリット部で生じるコンクリートのひび割れの影響を除くためである。

2.3 加力方法

加力は、図8に示すように単純梁形式で行った。この加力方法により、試験体は右側下端の試験部分のみが引張応力を受け、付着割裂破壊する。その時、右側上端の試験部分の主筋は若干の圧縮応力を受けるが、荷重を除荷したときの残留応力はほぼゼロであった。また、左側上下の試験部分が加力中に応力を受けないことは明らかである。つまり、右側下端以外の試験部分は、ほぼ無傷で残される。そこで、1カ所の試験部分を付着割裂破壊させたあと、試験体を左右および上下に入れ替え、1つの試験体で4カ所の試験部分のそれぞれの付着強度データを得ることができた。

3. 実験結果

3.1 破壊状態

実験終了時のひび割れ状態を図9に、その模式図を図10に示す。試験部分の破壊は次の様にして起こった。まず、スリット部に小さなひび割れAが入り、次に約45°のひび割れBが入る。荷重の増大とともにBのひび割れが幅広く開き、試験部分で主筋の抜け出しによる複数の斜めひび割れCが入り付着破壊に至る。

ただし、主筋が二段配筋（N8M）・二段目のみ（N4Md）の試験部分は図11の模式図に示すような破壊性状であった。どの試験体でも試験体の中央部分は最後までほぼ無傷であった。

3.2 付着応力

実験での付着応力 τ は、次式による。

表2 鉄筋の降伏強度と形状

		降伏強度 (tf/cm ²)	ふし形状
試験鉄筋	D 25	10.3	ネジふし P C 異形鋼棒
	D 13	7.3	斜めふし
あばら筋	D 10	(8.0)	インデント
	D 6	9.0	(楕円形のへこみ)
補助鉄筋	D 25	10.3	ネジふし P C 異形鋼棒
	D 19	(3.5)	横ふし

表3 コンクリートの配合と強度

粗骨材の最大寸法	単位量 (kg/m ³)				強度 (kgf/cm ²)	
	水	セメント	細骨材	粗骨材	圧縮	引張
15 mm	190	345	835	874	314	31.0

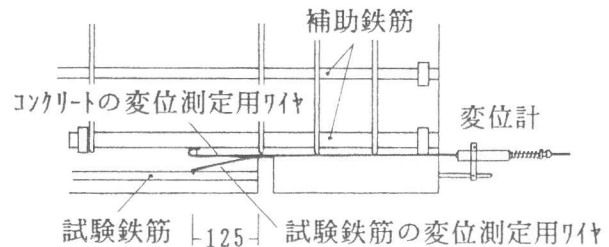


図7 試験鉄筋のすべり量測定 [単位: mm]

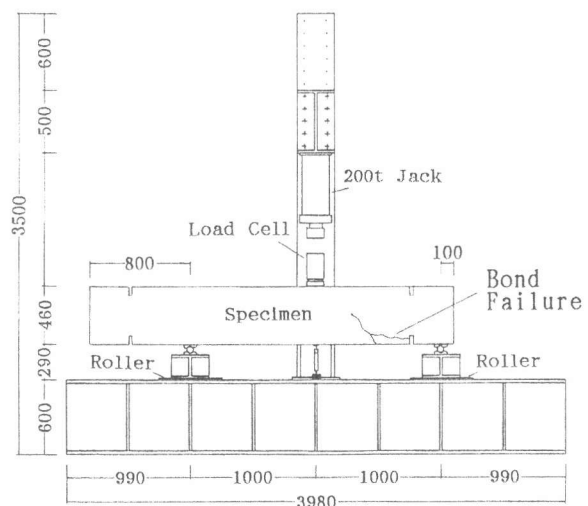


図8 加力装置 [単位: mm]

$$\tau = (d_b / 4 L) \cdot E \varepsilon \quad (1)$$

ただし、 d_b : 鉄筋の公称直径

L : 歪ゲージから自由端までの定着長さ (250 mm)

E : 鉄筋のヤング率 (2100 tf/cm²と仮定)

ε : 鉄筋の歪 (裏表2枚のゲージの平均)

実験で得られた付着強度を図12に示す。なお、各々の試験鉄筋のひずみは、必ずしも同時に最大値に達したわけではなかった。そこで図では、各試験鉄筋のひずみの合計が最大になったとき (つまり平均付着応力が最大となったとき) の個々の鉄筋の付着応力を印で示した。また、個々の鉄筋の最大ひずみから得られる付着強度を印で示した。この図では、コンクリートの打設方向はすべて左→右である。

(a) 計算値との比較

主筋4本の場合は、実験値 (破線) がすべて文献[2]の計算値 (実線) を上回った。特に、中子筋を有する試験体でその傾向が著しい。主筋7本の場合は、ほぼ計算値と同じであった。

(b) かぶりの有無の影響 (図12(a), (c), (g), (i))

かぶりの無い試験体の付着強度は、かぶりのある試験体より10%程度低かった。

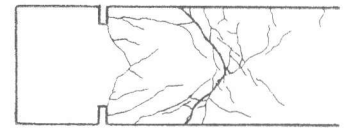


図9 試験体Dのひび割れ状態 (実験終了後)

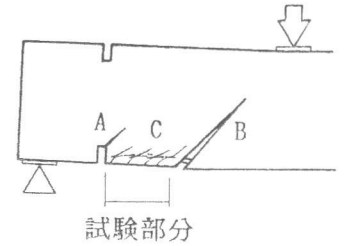


図10 破壊状況の模式図

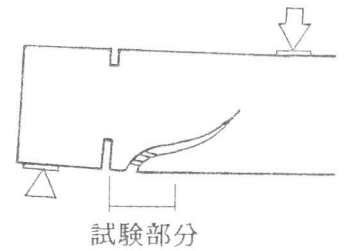


図11 二段配筋の破壊状況

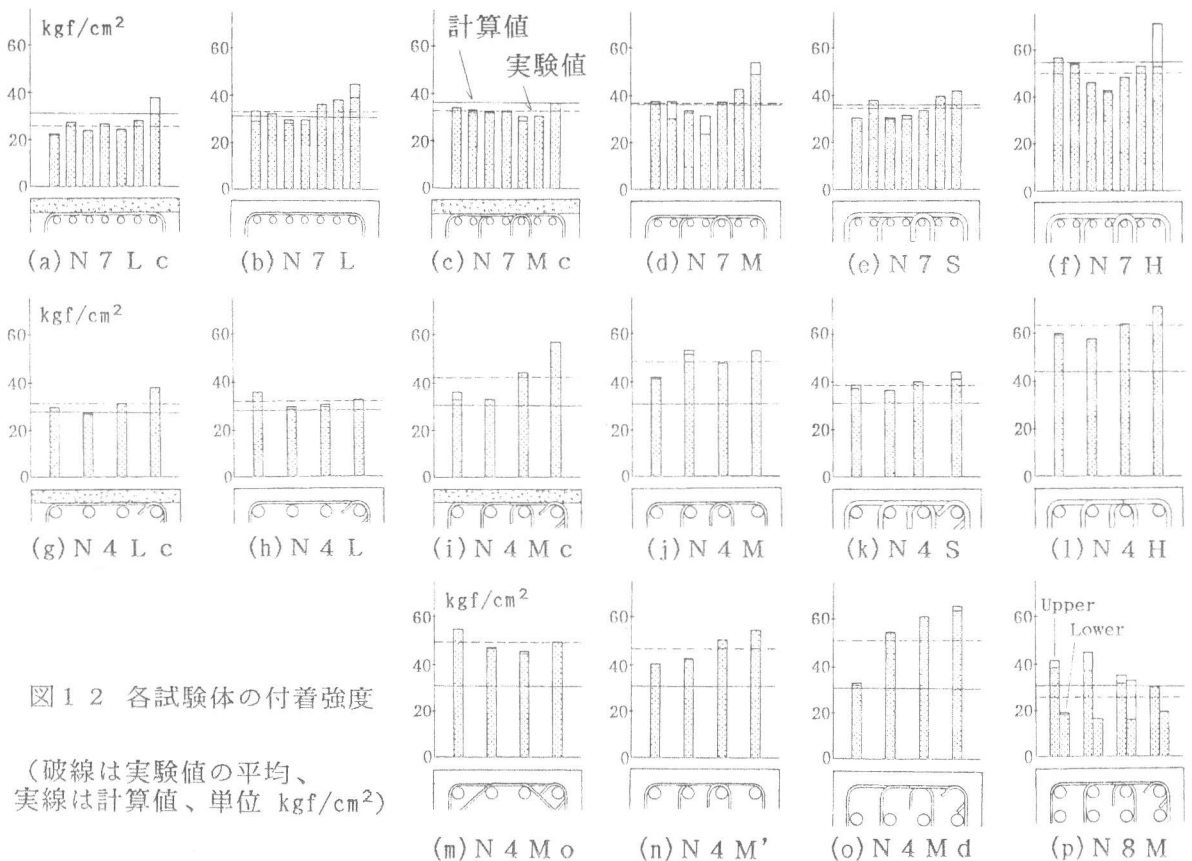


図12 各試験体の付着強度

(破線は実験値の平均、
実線は計算値、単位 kgf/cm²)

(c) 補強筋間隔の影響 (図 1 2 (e), (k))

あばら筋が太径で間隔の粗い試験部分の付着強度は、補強筋比が同じで間隔が密なものよりも 10%程度低かった。

(d) 載荷順序の影響 (図 1 2 (j), (n))

N 4 M、N 4 M' の試験部分は、配筋が同一で、載荷順序のみが異なる (それぞれ 1 番目と 4 番目)。両者の付着強度の差は 3%程度であり、載荷順序が実験結果に及ぼす影響は小さい。

(e) 45° 補強の効果 (図 1 2 (m))

45° 補強された試験部分 (N 4 M o) の付着強度は、中子筋によって補強された試験部分 (N 4 M, N 4 M') と比べて遜色ない。つまり、8 角形フープは、付着強度に関して中子筋と同程度に有効であると言える。

(f) 主筋とあばら筋のあき (図 1 2 (o))

主筋とあばら筋とのあきを意図的に大きくした試験部分 (N 4 M d) の付着強度は、通常のもの (N 4 M、N 4 M') より大きかった。ただし、この試験体ではひび割れ形状から見て、せん断破壊の可能性がある。つまり、真の付着強度はこれよりさらに高い可能性がある。

(g) 二段配筋の影響 (図 1 2 (p))

二段配筋とした試験部分 (N 8 M) は、あばら筋のひずみが降伏点を超えており、ひび割れの形状からもせん断破壊の可能性があるので、今回の実験からは二段配筋の影響を特定できなかった。

3.3 主筋の付着応力とすべり

図 1 3 に主筋の付着応力とすべり量との関係を示す。図中、実線はあばら筋の掛かった隅筋を、一点破線は中子筋の掛かった中間筋を、破線は何も掛かっていない中間筋を表す。また、指針 [2] による付着強度のコンクリート負担分 τ_{co} を \blacktriangleleft で示す。

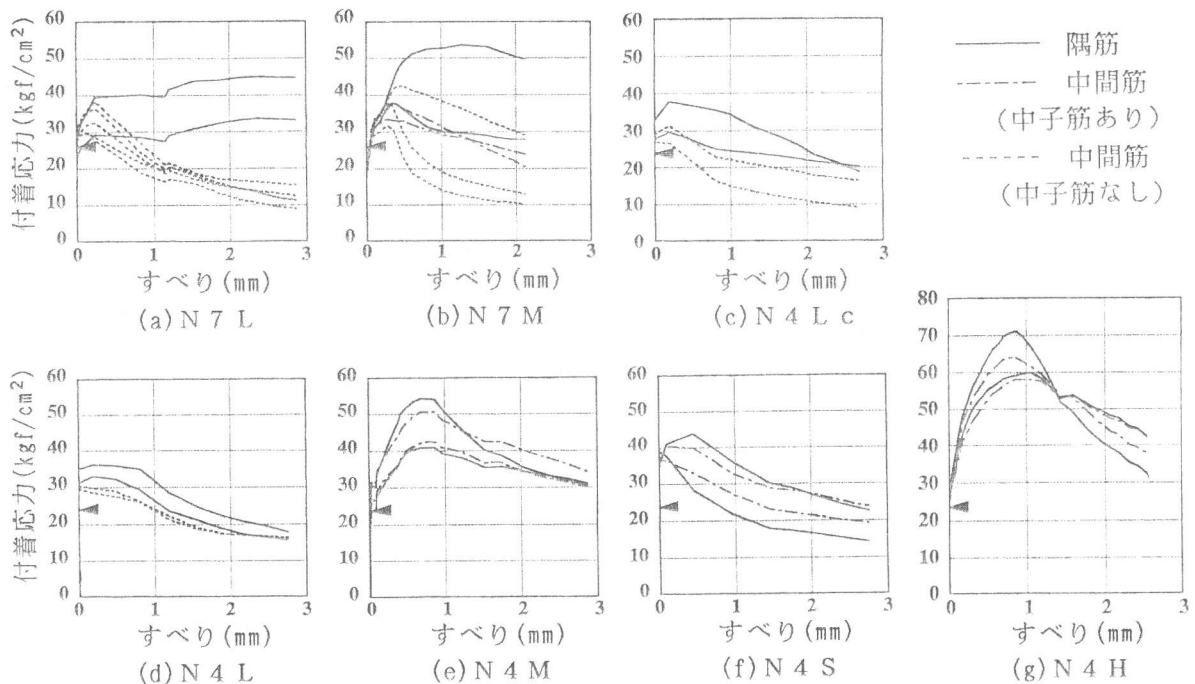


図 1 3 付着-すべり関係

どの試験部分も主筋がすべり出すまでは、隅筋・中間筋にかかわらず、どの主筋もほぼ τ_{co} の付着応力を負担している。この時、あばら筋の歪みは0である。その後すべりが始まり、あばら筋・中子筋の歪が生じ始めると共に、各主筋によって付着応力に差ができ最大耐力に達した。以下、各種の要因別に検討する。

(a) 中子筋のかからない中間主筋の付着すべり (図13 (a), (b), (d))

主筋7本の試験部分 (N7L、N7M) では、中子筋のかからない中間主筋の最大強度後の耐力低下が著しい。主筋4本の場合 (N4L) では、この傾向はそれほど顕著ではない。

(b) かぶりの有無の影響 (図13 (c), (d))

主筋4本でかぶりのない試験部分 (N4Lc) は、かぶりのあるもの (N4L) とくらべ、最大強度後の中間筋の付着応力の低下が著しい。

(c) 横補強筋間隔の影響 (図13 (e), (f))

間隔の粗い試験部分 (N4S) は間隔が密な試験部分 (N4M) よりも付着強度が小さく、耐力低下が早く生じた。

(d) 横補強筋量の影響 (図13 (d), (e), (g))

主筋4本で横補強筋量の違う試験部分 (N4L, N4M, N4H) を比較すると、鉄筋がすべり始めるまでは各試験体とも同等の付着応力を負担しているが、鉄筋がすべり始めると補強筋の少ない試験部分 (N4L) は付着応力があまり上昇する事なく最大耐力に達する。補強筋の多い試験部分 (N4M, N4H) は鉄筋がすべると共に付着強度がかなり上昇する。

4. 結 論

- (1) 本論文の方法により、1つの試験体で4つの付着割裂試験を行うことができる。
- (2) 指針[2] の付着強度算定式は、主筋の本数が多い場合には中子筋の有無にかかわらず安全率が低い。逆に、主筋が4本で中子筋がある場合には、安全率が高すぎる傾向がある。
- (3) 8角形フープは、付着割裂強度に関して中子筋と同程度に有効である。
- (4) 横補強筋比が同じでも、補強筋間隔が大きいと付着強度は小さくなり、耐力低下が早く生じる。
- (5) かぶりコンクリートがない場合の付着強度は、かぶりのある場合より10%程度低い。

謝 辞

豊橋科学技術大学助教授・角 徹三先生には本研究を行うにあたり、種々のご指導を得た。名古屋工業大学教授・福知保長先生、小野徹郎先生には、実験装置を快く貸して戴いた。新潟大学助教授・加藤大介先生には、かぶりコンクリートの無い試験体の必要性について示唆を戴いた。(社)鋼材倶楽部からは高強度鉄筋の供与を受けた。篤くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 藤井 栄、森田司郎：異形鉄筋の付着割裂強度に関する研究 (第1報)、日本建築学会論文報告集、No. 319、pp. 47-55、1982. 9
- 2) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説、1990. 11
- 3) 角 徹三、山田 守、合楽将三：鉄筋コンクリートはりの付着割裂強度に及ぼす横補強筋の効果、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 11, No. 2、pp. 177-182、1989