

論文 異形鉄筋の付着割裂強度における寸法効果

井上 芳樹*1 金山祐士*2 市之瀬敏勝*3 池田智彦*4

要旨:一昨年, 横補強筋がない場合に限定した異形鉄筋の付着割裂強度に関する実験を行った結果, 付着強度に及ぼす寸法の影響が顕著であった。本研究では, 異形鉄筋の付着部分に横補強筋を設け, 鉄筋周辺のコンクリートが強い拘束力を受ける状況下での付着割裂性状を調べる実験を行い, 寸法の影響について検証した。実験対象は一昨年同様, 引抜試験体と重ね継手試験体とした。実験の結果, 両試験体ともに横補強筋がない場合に比べ, 寸法の影響が小さかった。また, 重ね継手試験体より, 拘束効果が大きい引抜試験体の方が寸法の影響が小さかった。

キーワード:付着割裂破壊, 異形鉄筋, 寸法効果, 拘束効果, 節形状

1. はじめに

異形鉄筋の付着割裂破壊は, 主に鉄筋表面の節と周辺コンクリートとの機械的な相互作用により起こるものであるが, そのメカニズムは非常に複雑であると考えられている。一昨年, 横補強筋がない場合に限定した異形鉄筋の付着割裂強度に関する実験を行ったが, 付着強度に及ぼす寸法の影響が顕著であるという結果を得た。そこで本研究では, 付着部分に横補強筋を設け, 異形鉄筋の周辺のコンクリートが強い拘束力を受ける状況下での付着割裂破壊性状を考え, 寸法の影響について検証した。また, 節高さ/節間隔比が違う2種類の異形鉄筋を用い, 節形状の影響についても同時に検証した。これらの検証は一昨年同様, 鉄筋の引抜実験とはりの重ね継手実験より行った。

2. 実験概要

2.1 主筋詳細

図-1, 表-1に実験で使用した主筋形状を示す。単位長さ当りの重量が等しくなるように, 主筋の公称直径($=d_b$)を定義し, 節間隔及び節高さは d_b に対応させた。 d_b を17.4, 34.8, 52.2mmの3種類, 節高さ/節間隔比($h/l_n=R_f$)を0.075(主筋形状A),

0.275(主筋形状B)の2種類を組み合わせ, 計6種類の鉄筋を用いた。一昨年の実験では, 主筋形状Bのみを使用した。また, 節角度は45度で一定とし, 主筋の引張強度は600MPaとした。

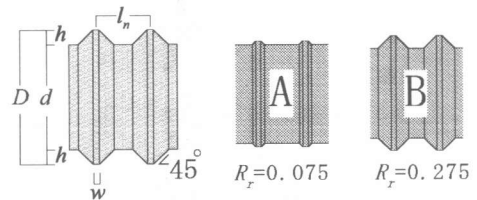


図-1 主筋詳細

表-1 主筋形状

主筋形状	D	d	h	l_n	w	$R_f = h/l_n$
A-type	$1.06d_b$	$0.99d_b$	$0.035d_b$	$0.46d_b$	$0.052d_b$	0.075
B-type	$1.15d_b$	$0.90d_b$	$0.127d_b$	$0.46d_b$	$0.052d_b$	0.275

$d_b = 17.4, 34.8, 52.2$ (mm)

2.2 引抜試験体詳細と加力方法

表-2に試験体名と形状寸法を示す。試験体は主筋をパラメータとし, 6種類, 各3体ずつ計18体製作したが, コンクリートのかぶり部分より外側の部分がせん断破壊し, 試験体中央の主筋がすべり抜けなかった試験体を加力に失敗したと見なし, 計測結果から除外した。試験体名称はBH:引抜試験体-主筋公称直径-主筋形状を順に並べたものとした。また, すべての試験体寸法は d_b に対応させた。試験体表面は30日間湿度100%で養生し, そ

*1 名古屋工業大学大学院 工学研究科社会開発工学専攻 (正会員)

*2 名古屋工業大学大学院 工学研究科社会開発工学専攻 (正会員)

*3 名古屋工業大学教授 工学部システムマネジメント工学科 工博 (正会員)

*4 名古屋工業大学大学院 工学研究科社会開発工学専攻 (会員外)

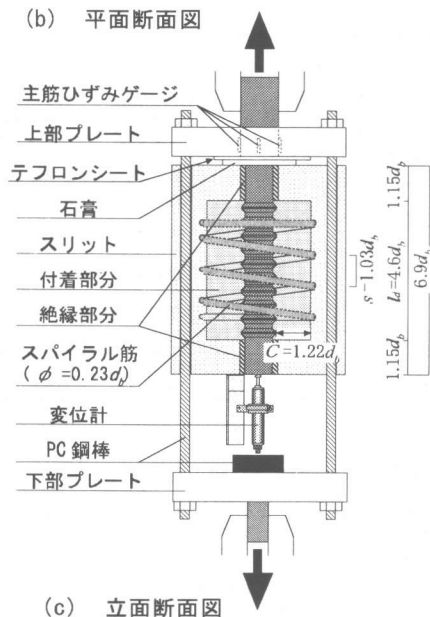
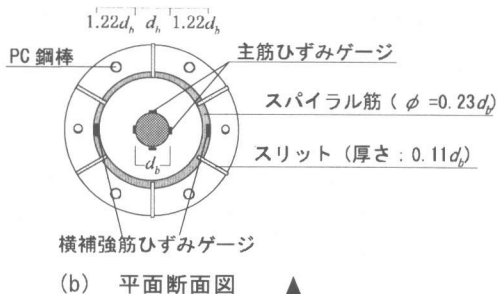
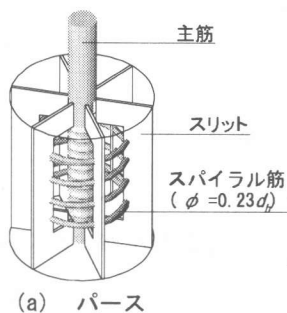


図-2 引抜試験体詳細

の後自然乾燥させた。図-2に引抜試験体形状と加力方法を示す。主筋を円筒状のコンクリートの中央に埋め込み、付着部分のコンクリートに強い拘束力を与えるため、 $\phi (=0.23 d_b)$ 4, 8, 12mmの横補強筋をそれぞれピッチ($s=1.03 d_b$) 18, 36, 54mm, 直径($=3.9 d_b$) 68, 136, 204mmのスパイラル状に配置した。付着長さ l_d は $4.6 d_b$ とし、引張端、自由端側に各 $1.15 d_b$ の絶縁部を設けた。コンクリートのかぶり厚さ C は、6枚のスリット(厚さ: $0.11 d_b$)

表-2 引抜試験体一覧

試験体名	d_b (mm)	l_d (mm)	C (mm)	ϕ (mm)	s (mm)	試験体数		材令(日)
						製作数	成功数	
H17A	17.4	80	21.3	4	18	3	3	78~79
H17B							2	
H35A	34.8	160	42.6	8	36	3	3	76~77
H35B							1	
H52A	52.2	240	63.9	12	54	3	0	97
H52B							1	

H17A

主筋節形状
主筋公称直径
引抜試験体

表-3 コンクリート材料特性

	圧縮強度 σ_B (MPa)	引張強度 σ_t (MPa)	弾性係数 E (MPa)	破壊エネルギー G_F (N/m)
平均値	37.4	2.76	2.21×10^4	108
標準偏差	0.30	0.24	0.08×10^4	20.1

表-4 横補強筋材料特性

	引張強度 σ_t (MPa)	弾性係数 E (MPa)
$\phi 4$	551	2.04×10^4
$\phi 8$	493	2.13×10^4
$\phi 12$	476	2.16×10^4

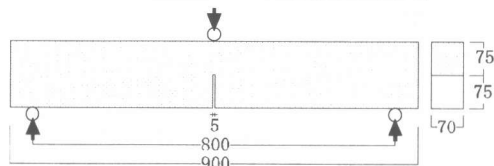


図-3 G_p 試験体詳細

を用いて調節し、 $1.22 d_b$ とした。図-2(b), (c)に示すように、加力は主筋の外周にPC鋼棒を6本埋め込み、試験時に端部を固定して、上下のプレートを用い反力をとった。なお、加力はアムスラーで行った。かぶり部分のみが均等に加力されるように、試験体上部表面の主筋周囲に石膏を塗り上部プレートを水平に設置した。上部プレートと石膏との間には、摩擦をさけるためテフロンシートを設けた。また、主筋を試験体に対して垂直に引き抜くため、主筋の表面4箇所にひずみゲージを貼り(図-2(b), (c)参照)、主筋ひずみを調節しながら実験を行った。ひずみの調節は主筋ひずみの値に差がある場合、上下のプレートを固定するボルトを締めて行った。全試験体底面の主筋部分には変位計を取り付け、主筋のすべり量を測定した。さらに、図-2(b)のように、各種類一休ずつ横補強筋にひずみゲージを貼り、横補強筋のひずみ分布を調べた。

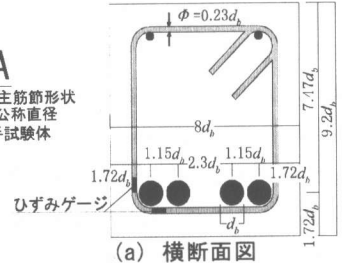
実験で使用したコンクリート及び横補強筋の材料特性を表-3, 4にそれぞれ示す。 G_p の測定実験は、RILEM Committee²⁾を参考に行った。図-3に G_p 試験体詳細を示す。

表-5 重ね継手試験体一覧

試験体名	d_b (mm)	重ね長さ $l_s=12.6d_b$	横補強筋径 $\phi=0.23d_b$	横補強筋間隔 $s=1.41d_b$	試験体数 ゲージ有	試験体数 ゲージ無	材令 (日)
K17A K17B	17.4	220	4	24.5	1	2	54~56
K35A K35B	34.8	440	8	49	1	1	35~40
K52A K52B	52.2	660	12	73.5	1	0	41~42

K17A

主筋節形状
主筋公称直径
重ね継手試験体



(a) 横断面図

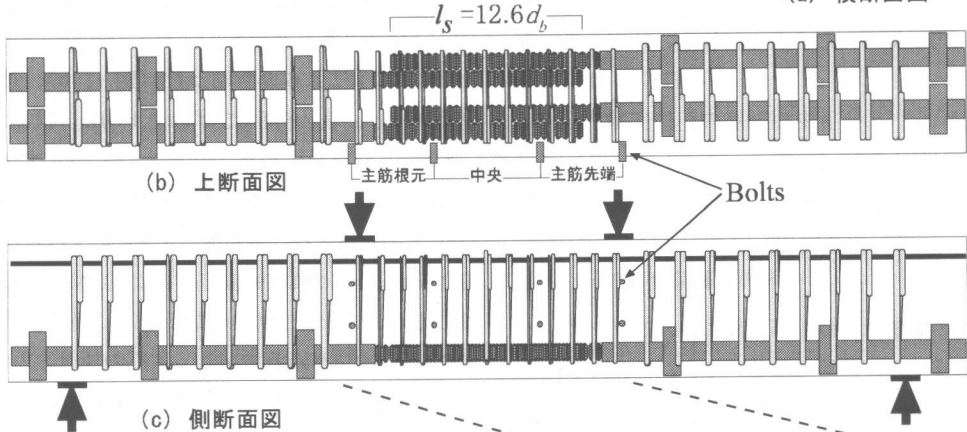


図-4 重ね継手試験体

2.3 重ね継手試験体詳細と実験方法

表-5 に重ね継手試験体名と形状寸法を示す。

試験体は主筋をパラメータとし、K17シリーズを各3体、K35シリーズを各2体、K52シリーズを各1体、計12体製作した。試験体名はK:重ね継手試験体-主筋公称直径-主筋形状を順に並べたものとした。図-4に重ね継手試験体形状と載荷方法を示す。各試験体には2組の重ね継手部分を設け、継手長さを $12.6d_b$ とした。主筋同士は山と谷で直接かみ合わないよう設置した。重ね継手領域には直径($=\phi$) $0.23d_b$ の横補強筋を $1.41d_b$ の間隔で10本配置し、コンクリートに拘束力を与えた。また、各種類一体ずつ、重ね継手領域とその周辺における横補強筋の図-4(a)に示す位置にひずみゲージを貼り、横補強筋のひずみを調べた。全試験体において、重ね継手領域の試験体側面に8本のボルトを埋め込み、変位計を3つ設置し(図-5参照)、コンクリートのひずみを測定した。変位計の名称は設置側面に隣接した主筋に合わせて、左から主筋根元、中心部分、主筋先端とした。載荷は主筋を下側にし、重ね継手領域が

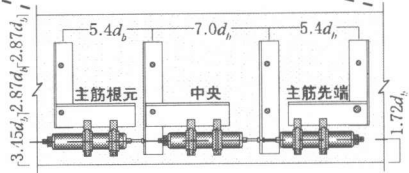


図-5 変位計の位置

純曲げとなるように2点集中で行った。コンクリート及び鉄筋の材料特性は、引抜試験体と同様である(表-3、4参照)。

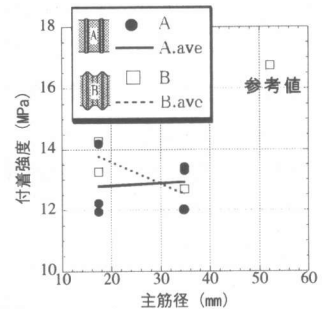


図-6 付着強度-主筋径関係

3. 実験結果

3.1 引抜実験結果

(1) 寸法と節形状の影響

図-6に付着強度と主筋径の関係を示す。H52Bの付着強度がH17、H35と比較して大きな値となった。これはすべての試験体に同一のコンクリートを用いたため、H52Bのみ節と節の間に骨

材が入り込んだことによるものと推測される。また、H52シリーズの中で加力に成功したのは一体のみと少ないため参考値扱いとした。主筋径 d_b が17.4mmと34.8mmのものを比較すると、寸法及び節形状の違いが付着強度に与える影響は小さいと言える。寸法・節形状の影響があまり見られなかったのは、横補強筋によりコンクリートに強い拘束力が働いたためと思われる。非常に強い拘束力を与えたコンクリート中の鉄筋の引抜実験(鋼管コンクリート中の鉄筋の引抜実験³⁾)より、次式(1)が得られている。

$$\tau_{\max} = 1.7 f_c^{0.85} \quad (1)$$

$\tau_{\max}$: 付着強度 (MPa)
 f_c : コンクリートの圧縮強度 (MPa)

この時の破壊は、鉄筋節表面におけるコンクリートの直接せん断破壊である。 $\tau_{\max}$ はコンクリートの強度関数である。今回の実験における破壊パターンを検討するため、この式(1)を用いて実験で使用したコンクリートの圧縮強度を代入すると、 $\tau_{\max}$ は36.9MPaとなった。この値は今回の実験値より3倍程度大きく、付着強度はコンクリートの直接せん断破壊により決定されたものではない。しかし、付着強度と主筋径の関係より、ある程度強い拘束力を受けるコンクリート内の異形鉄筋による付着破壊において、寸法や主筋節形状の影響は小さいと言える。

(2) 付着応力-すべり量関係

図-7に各試験体の代表的な付着応力と主筋径に対するすべり量の関係を示す。H52Aについては、加力に失敗したため省略した。主筋節形状の違い(Aと

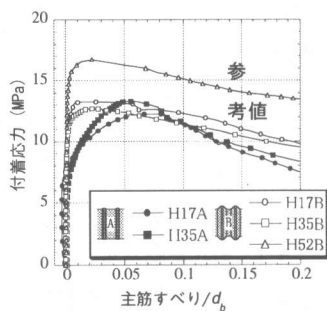


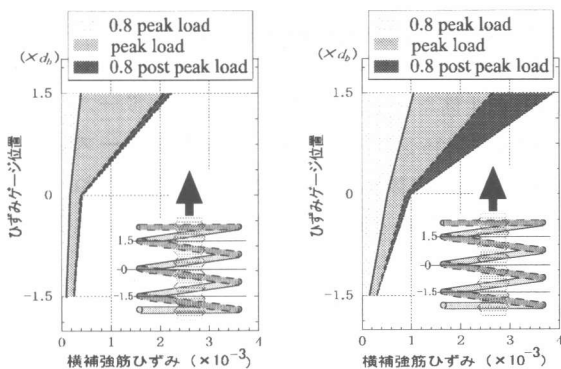
図-7 付着応力-すべり量関係

B)で付着強度を比較するとあまり差がないのに対し、すべり量を比較するとピーク時のすべり量

はBよりAの方が大きい。また、ピーク後のすべり挙動を比較すると、AよりBの方が若干緩やかに応力を下げている。

(3) 横補強筋ひずみ分布

図-8にH35A, Bのピーク時とピーク前後の横補強筋(スパイラル筋)のひずみ分布を示す。ひずみゲージは、付着部分の中心位置と中心から上下に約 $1.5d_b$ 離れた位置のスパイラル筋に、主筋を挟むように計6カ所貼った(図-2(b), 図-8参照)。そして、各面でひずみを平均し、横補強筋のひずみ分布を求めた。ただしH17, H52の横補強筋ひずみゲージを貼った試験体は、加力に失敗したため省略する。主筋節形状で比較すると、図-8に示すように横補強筋ひずみは全体的にAよりBの方が大きい。また、Aに比べBの方がピーク後のひずみ増加が顕著であり、主筋の放射応力が大きいと言える。また、A・Bどちらも付着部分中央より上部(引張端)で特に大きい。このことにより、主筋の放射状作用が引張端で強いと言える。



(a) H35A (b) H35B

図-8 横補強筋ひずみ分布

3.2 重ね継手実験結果

(1) ひずみゲージの影響

表-6に重ね継手実験の結果を示す。重ね継手実験における付着強度は式(2)より算出した。

$$\tau_{\max} = \frac{M_u}{j \cdot \Psi \cdot l_s} \quad (2)$$

M_u : はりの最大曲げモーメント

j : 応力中心間距離 (有効せいの0.9倍と仮定)

Ψ : 主筋2本分の周長 ($= 2\pi d_b$)

l_s : 重ね継手長さ ($= 12.6d_b$)

重ね継手部分の横補強筋に貼り付けたひずみゲ-

ジの有無により、付着強度に大きな差が見られた。ひずみゲージの有るものは無いものに比べ、K17は平均して25%、K35は平均して21%付着強度が低下した。これは図-9に示すように、主筋とコンクリートとの接触面積が減少したため

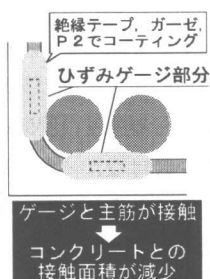


図-9 ひずみゲージの影響

と考えられる。また、試験体の寸法が大きくなると、主筋と横補強筋の隙間が増し、主筋とひずみゲージ部分の接触面積は減少する。しかし、K17とK35のひずみゲージによる強度低下率にあまり差がないのは、K17はK35に比べひずみゲージ部分を短くし、厚みも減らしたためと思われる。なお、K52の試験体は寸法が大きいため、ひずみゲージ部分が主筋に接触することはない、ひずみゲージの影響はほとんど無いと考えられる。

(2) 寸法と節形状の影響

図-10に付着強度と主筋径の関係を示す。ゲ

表-6 重ね継手実験結果一覧

試験体名	横補強筋のひずみゲージの有無	最大荷重 (kN)	付着強度 (MPa)	強度比 ゲージ有/ゲージ無
K17A	○	63.89	3.80	0.72
	×	87.15	5.19	
	×	89.45	5.32	
K17B	○	105.17	6.26	0.78
	×	126.79	7.55	
	×	142.53	8.48	
K35A	○	252.12	3.75	0.81
	×	309.59	4.61	
	×	354.63	5.28	
K35B	○	442.83	6.59	0.8
	×	652.49	4.29	
	×	845.83	5.57	
K52A	○			1.0 (予想値)
K52B	○			

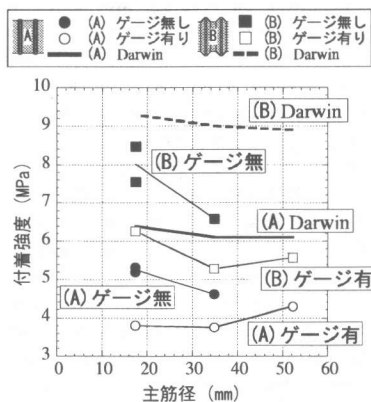


図-10 付着強度-主筋径関係

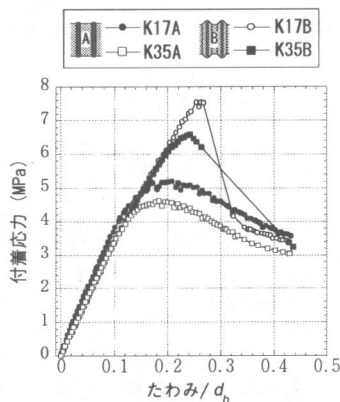


図-11 付着応力-たわみ関係

ジの影響を受けていないK17A, B とK35A, B を比較する。寸法の違いで比較すると、主筋径が17.4mmから34.8mmの2倍になると付着強度は約18%減少し、寸法の影響は存在した。次に、主筋形状の違い(AとB)で比較すると、Aに比べBの試験体は付着強度が平均して1.5倍程度となり、節形状の影響は大きいものであった。また、図-10にはDarwin⁴⁾の付着強度式より求めた値を同時に記した。実験結果と比較すると、全体的には20~30%大きい値となった。また、実験結果は寸法の影響が強度式より大きかった。

(3) 付着応力-たわみ関係

図-11に横補強筋にひずみゲージが貼られていない試験体における付着応力と試験体中央のたわみの関係を示す。K52については各1体ずつ作製したため、ひずみゲージが貼られていない試験体がなく省略した。図-10より主筋径の違いが付着強度に与える影響は見られたが、主筋径に対するたわみに関してもピーク時で平均して約11%減少し、寸法の影響は存在した。主筋節形状の違いによるたわみを比較するとピーク時のたわみはAよりBの方が大きく、ピーク後、緩やかに応力を下げていくAに対しBは急激に耐力を失った。

(4) 破壊状況

図-12に付着応力と試験体側面に設置した変位計より測定した平均ひずみの関係の一例(K52B)を示す。すべての試験体において、主筋根元・中央部分と主筋先端部分の平均ひずみの差が大きかった。

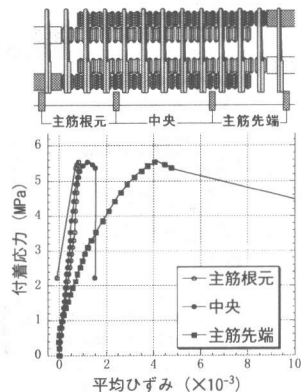


図-12 付着応力-平均ひずみ関係の一例 (K52B)

ピーク後、主筋根元・中央部分のひずみはほとんど増えなかったのに対し、主筋先端部分はさらに増大した。図-13に試験体側面のひび割れ状態(K52B)を示す。側面におけるひび割れは非対称ではあったが、一昨年の実験で使用した補強筋が無い試験体と同様、主筋先端付近にひび割れが集中した。ひび割れの伸展具合は、試験体側面における平均ひずみが主筋先端部分で増大したこととよく対応している。これらのことから、重ね継手部分では主筋先端部分から主筋根元方向へ三次元的にねじれ変形しながら破壊していったと言える。また、寸法や主筋節形状の違いが試験体側面のひび割れ状態に及ぼす影響はあまり見られなかった。

(5) 付着応力と横補強筋ひずみの関係

図-14にK52A, Bの付着応力と重ね継手部分中央における横補強筋ひずみの関係を示す。図のように横補強筋の上と下の2箇所にひずみゲージを貼り、測定した結果、上と下のひずみにあまり差がなかった。こうした傾向は、補強筋の位置、

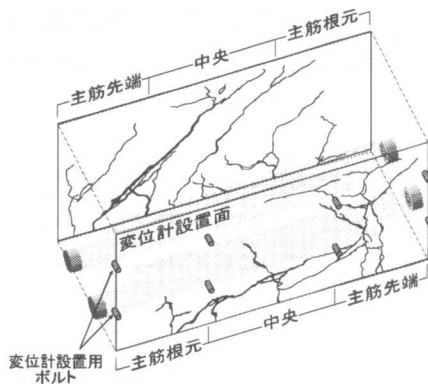


図-13 ひび割れ状態 (K52B)

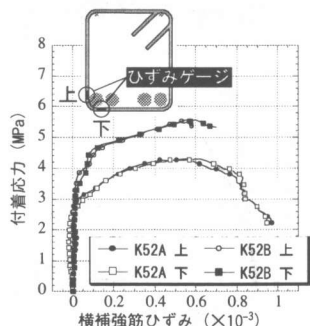


図-14 付着応力-横補強筋ひずみ関係の一例

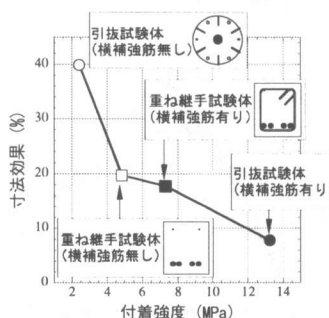


図-15 寸法効果-付着強度の関係

主筋節形状、寸法に関係なく見られた。

3.3 寸法効果と付着強度の関係

一昨年と今回の実験結果より、図-15に寸法効果と付着強度の関係を示す。一昨年行った横補強筋を設けなかった実験では主筋形状Aを使用しておらず、主筋形状Bの結果で比較した。図中の付着強度、寸法効果はそれぞれ式(3)、(4)から求め、両者の関係を示した。

$$\text{付着強度} = \frac{\tau_{17} + \tau_{35}}{2} \quad (3)$$

$$\text{寸法効果} = \frac{\tau_{17} - \tau_{35}}{\tau_{17}} \quad (4)$$

τ_{17} : 主筋径17.4mmの付着強度 (MPa)

τ_{35} : 主筋径34.8mmの付着強度 (MPa)

図-15より、付着強度が高いほど寸法効果は小さくなった。同じ条件下では、コンクリートに与える拘束力が強いほど付着強度は高くなる。よって、拘束効果が大きいほど寸法効果は小さくなると言える。

4. 結論

1. 付着強度において寸法効果は存在するが、拘束効果が大きいほど寸法効果は小さくなった。
2. 主筋の節高さ/節間隔比が大きくなると、重ね継手試験体では付着強度は高くなり、破壊は脆性的になる。しかし、拘束効果が大きい引抜試験体では、主筋節形状の影響は見られなかった。

[参考文献]

- 1) W. Lin, Y. Kanayama, and T. Ichinose: Experimental Research on the Effect of Rib Shape and Bar Diameter on Bond Strength, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.3, pp.289-294, 1999
- 2) RILEM Committee on Fracture Mechanics of Concrete-Test Methods, Determination of the Fracture Energy of Mortar and Concrete by Means of Three-Point Bend Tests on Notched Beams, *Materials and Structures*, Vol. 18, No.106, pp.285-290, 1985
- 3) 赤司二郎, 藤井栄, 森田司郎: コンクリート強度と鉄筋節形状が付着特性に与える影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.13, No.2, pp.127-132, 1991
- 4) D. Darwin, M.L. Tholen, E.K. Idun, and J. Zuo: Splice Strength of High Relative Area Reinforcing Bars, *ACI Structural Journal*, Vol. 93, No.1, pp.95-107, Jan.-Feb, 1996