

論文 束ね鉄筋の付着割裂強度に関する研究

田畑 卓*¹・西原 寛*¹・松本智夫*²・鈴木英之*²

要旨：梁主筋を2本束ね配筋した場合の付着割裂強度について、横補強筋比、中子筋の有無、および束ね方向を変動因子とする実験を行った。試験体は曲げ降伏以前の付着割裂破壊(サイドスプリット型)を指向し、加力は単純梁形式の1方向単調載荷とした。付着割裂強度は、横補強筋比の上昇に従い高くなり、また同一横補強筋比であれば中子筋を配した方が高くなる傾向を示した。横補強筋による付着割裂強度の上昇率は、主筋の束ね方向によって異なり、主筋を梁幅方向に束ねたものに比べ梁せい方向に束ねたものが大きくなる傾向であった。

キーワード：束ね鉄筋、付着割裂強度、横補強筋比、中子筋、束ね方向

1. はじめに

束ね鉄筋は、鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説(以下、RC規準)において、その1組を断面積の等価な1本の太径鉄筋に置き換えて付着設計を行うものとされている。これは鉄筋が互いに接することによる有効周長の減少を考慮したものであり、斉藤らの研究[1]がその基礎となっているものと考えられる。しかしながら、斉藤らの実験は1組の束ね鉄筋による引き抜き試験であるため、これを実部材にそのまま反映させるには不十分である点も否めず、また、付着割裂強度そのものについても言及されていない。さらに、小前ら[2]はRC規準に則る付着割裂強度の評価手法を示しているが、試験体数が少なく定量的な検討までには至っていない。そこで、本研究では主筋を2本ずつ束ねて配筋した梁部材が、曲げ降伏以前にサイドスプリット型の付着割裂破壊となる場合を想定して、束ね鉄筋の付着割裂強度に及ぼす横補強筋比、中子筋の有無、および束ね方向等の基礎的な因子の影響について定量的な検討を行った。

2. 試験体および使用材料

図1に試験体形状および配筋例を、表1に試験部の一覧を示す。試験体は、市之瀬らの実験[3]を参考にした単純梁であり、1試験体は2つの試験区間において、上端と下端の計4つの実験が可能である。配筋は試験鉄筋の曲げ降伏以前での付着割裂破壊を実現するため、断面の内側に補助

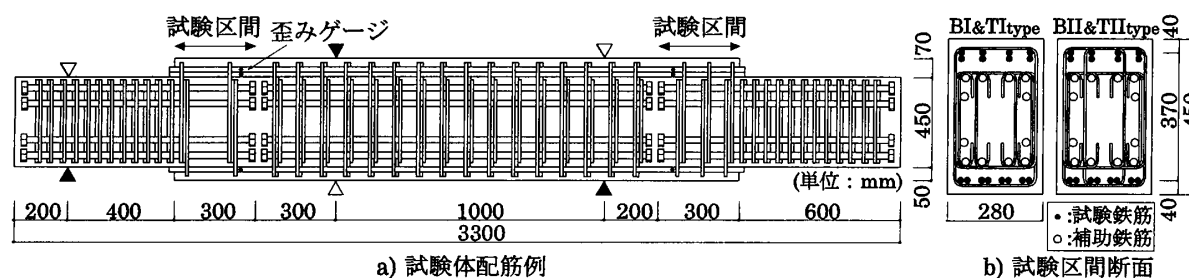


図1 試験体形状および配筋例

*1 安藤建設(株)技術研究所(正会員)

*2 安藤建設(株)技術研究所、工修(正会員)

鉄筋(ねじ節鉄筋)を配し、束ね鉄筋端から30cmの位置で縁を切ることにより、この位置での曲げ引張り応力を全て束ね鉄筋が負担するようにしている。なお、端部の定着はナットおよびワッシャーにより確保した。横補強筋は試験区間において上端、下端とも別々に束ね鉄筋から反対側のねじ節鉄筋に掛け、下端加力後、上端加力時にプレストレスが生じるのを防いだ。

試験鉄筋はD16の異形鉄筋を用いた2本束ね鉄筋とし、試験区間の上端と下端に4組ずつ配筋したが、束ね方法による影響を検討するため、上端では部材せい方向(以下、縦束ね)、下端では部材幅方向(以下、横束ね)に鉄筋を束ねた。また、横補強筋比を $p_w=0\sim 1.6\%$ まで変化させるとともに、既往の研究で指摘されている中子筋の効果についても検討するため、中子筋のあるものとなしものを計画した。

使用材料の力学的性質を表2に示す。試験鉄筋は高強度鉄筋のSD685、横補強筋は 8ϕ の高強度鉄筋による溶接閉鎖型とした。コンクリートは目標圧縮強度を27MPaとする最大骨材寸法13mmの早強コンクリートとし、打設は断面上方向から行った。

3. 加力および計測方法

加力は単純梁形式の一方単調荷重とした。加力の制御は、明らかな荷重低下が認められるまで荷重制御により行い、加力の手順は、一方の試験区間を下端、上端の順序で行った後、他方を同様に行うものとした。この場合、上端の試験鉄筋は下端加力時の影響を受ける懸念があるが、全試験体において下端加力後の荷重ゼロの時点で残留歪みは認められなかった。試験鉄筋の歪みの計測は、ねじ節鉄筋の切断位置から加力点に向かうせん断ひび割れを考慮し、束ね鉄筋終端から24cm(15db, db:試験鉄筋径)の位置で行った。また、支点と加力点の相対変位を変位計により計測した。

4. 実験結果の検討

4.1 破壊経過

図2にBI-12, TI-12($p_w=1.2\%$, 中子筋なし)の最終ひび割れ状況を示す。各試験体ともまず、ねじ節鉄筋切断位置(束ね鉄筋終端から30cm)近傍に曲げひび割れが発生し、荷重の上昇とともにこれが加力点方向に伸展した。その後、束ね鉄筋に沿った付着割裂ひ

表1 試験部一覧

試験部名	主筋	横補強筋		断面模式図	
		配筋	$p_w(\%)@(\text{cm})$		
BI-00	横束ね (下端)		0	—	
BI-02			0.2	18.0	
BI-04			0.4	9.0	
BI-06			0.6	6.0	
BI-08			0.8	4.5	
BI-12			1.2	3.0	
BII-04	4-S8		0.4	18.0	
BII-08			0.8	9.0	
BII-12			1.2	6.0	
BII-16			1.6	4.5	
TI-00	縦束ね (上端)		0	—	
TI-02			0.2	18.0	
TI-04			0.4	9.0	
TI-06			0.6	6.0	
TI-08			0.8	4.5	
TI-12			1.2	3.0	
TII-04	4-S8		0.4	18.0	
TII-08			0.8	9.0	
TII-12			1.2	6.0	
TII-16			1.6	4.5	

表2 使用材料の力学的性質

a) 鉄筋

種別	使用箇所	σ_y	ϵ_y	σ_{max}	E_s
D16	主筋	732	3610	964	203
S8	横補強筋	997	4870	1140	205
D22	補助鉄筋	443	—	—	—

σ_y :降伏応力(MPa), ϵ_y :降伏歪み(μ),
 σ_{max} :最大応力(MPa), E_s :ヤング率(GPa)

b) コンクリート

圧縮強度 (MPa)	割裂強度 (MPa)	ヤング率 (GPa)	最大骨材寸法 (mm)	分類
27.1	2.56	24.5	13	早強

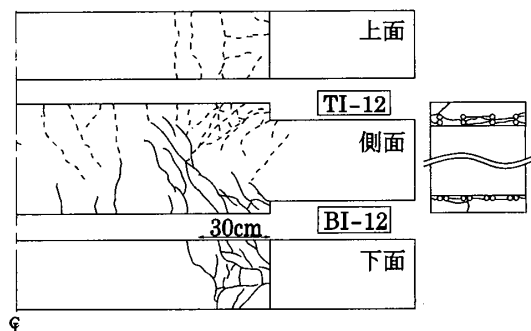


図2 最終ひび割れ状況例

び割れが試験区間で複数発生し、最終的にはこの付着割裂ひび割れの拡大によって破壊に至った。付着割裂パターンは横束ね、縦束ねのいずれも各鉄筋間にひび割れが連なるサイドスプリット型であると判断されるが、縦束ねでは、束ねられた上側の鉄筋を連なるひび割れと下側の鉄筋を連なるひび割れがそれぞれ発生した。主筋の降伏は、いずれの試験体においても認められず、また、試験区間以外では軽微なひび割れが数本発生する程度であった。各試験部の最終破壊形式は、TI-00を除く全試験部で付着割裂破壊、TI-00でせん断破壊であった。

4. 2 各鉄筋の付着割裂強度

表3に実験結果の一覧を示す。ここでは最大耐力時の付着応力度を付着割裂強度と定義し、式(1)により算定を行った。ただし、束ね鉄筋の周長は各鉄筋の全周長が有効であるとして、そのままの周長φを用いた。

$$\tau_{Bu} = a_t \cdot E_s \cdot \epsilon_t / (\phi \cdot L) \quad (1)$$

ここで、 a_t :鉄筋断面積(mm²)、 E_s :鉄筋のヤング係数(GPa)、 ϵ_t :最大耐力時の鉄筋歪み(μ)、L:ゲージ位置までの長さ(mm)

図3に束ねられた鉄筋2本の付着割裂強度比を示す。横束ねの付着割裂強度比は概ね、隅筋、中間筋ともに1.0程度であるので、この場合の束ねられた2本の鉄筋相互の付着割裂強度は同等であると考えて良いものと思われる。これに対し、縦束ねでは付着割裂強度比が必ずしも1.0となっておらず、また、相互の大小関係にもばらつきがみられる。これは横束ねにおいて全鉄筋を連なるように、縦束ねにおいて上下の鉄筋位置で個別にサイドスプリット型のひび割れが発生することに起因しているものと考えられる。

図4は、横補強筋比 $p_w=1.2\%$ の試験体を例に、縦束ねにおける各鉄筋の付着応力度 τ_B と荷重Pの関係を示したものである。なお、図は1組の束ね鉄筋を条件別に示した。付着割裂強度以降に着目すると、図a)c)d)のように横補強筋の隅角部に束ね鉄筋が配された場合では内側筋(例えば②)で急激に付着応力度が低下しており、個々の束ね鉄筋としては、この鉄筋が束ね鉄筋の付着割裂破壊に大きく影響していることが解る。一方、図b)のように束ね鉄筋が横補強筋の辺上に配され

表3 実験結果一覧

試験部	pw (%)	qst	Pmax (kN)	付着割裂強度 τ_{Bu} (MPa)				
				①	②	③	④	Ave.
BI-00	0	0	186.2	1.80	1.79	1.76	1.80	1.79
BI-02	0.2	0.44	193.6	2.24	2.06	1.82	1.85	1.99
BI-04	0.4	0.88	195.8	2.17	2.08	1.56	1.54	1.84
BI-06	0.6	1.31	216.4	2.53	2.45	1.95	1.92	2.21
BI-08	0.8	1.75	245.9	2.86	2.72	1.88	1.97	2.36
BI-12	1.2	2.63	222.3	3.10	2.68	1.71	1.74	2.31
BII-04	0.4	0.88	220.1	2.38	2.46	2.21	2.13	2.29
BII-08	0.8	1.75	220.1	2.42	2.39	2.00	1.95	2.19
BII-12	1.2	2.63	313.6	3.65	3.51	3.22	3.00	3.35
BII-16	1.6	3.50	320.2	3.80	3.73	3.24	3.10	3.47
TI-00	0	0	139.1	—	—	—	—	—
TI-02	0.2	0.88	187.0	1.87	1.75	1.74	1.75	1.78
TI-04	0.4	1.75	243.6	2.60	2.26	2.48	2.54	2.47
TI-06	0.6	2.63	254.7	3.17	2.95	2.58	2.74	2.86
TI-08	0.8	3.50	265.0	3.10	2.98	2.63	3.31	3.00
TI-12	1.2	5.25	302.5	3.77	3.62	2.53	3.00	3.23
TII-04	0.4	1.75	232.6	2.13	1.99	2.77	2.78	2.42
TII-08	0.8	3.50	323.1	3.50	2.57	4.31	3.59	3.49
TII-12	1.2	5.25	397.5	4.36	3.03	5.23	4.56	4.30
TII-16	1.6	7.00	420.3	4.56	3.66	5.45	5.16	4.71

①②③④は図3参照

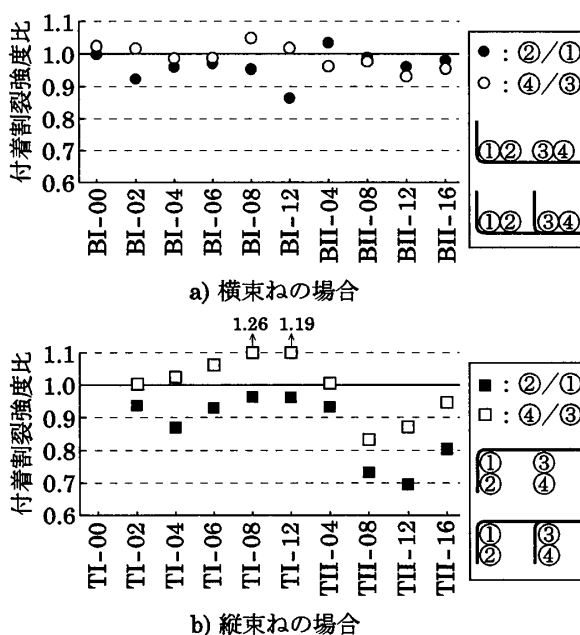


図3 束ねられた鉄筋2本の付着割裂強度比

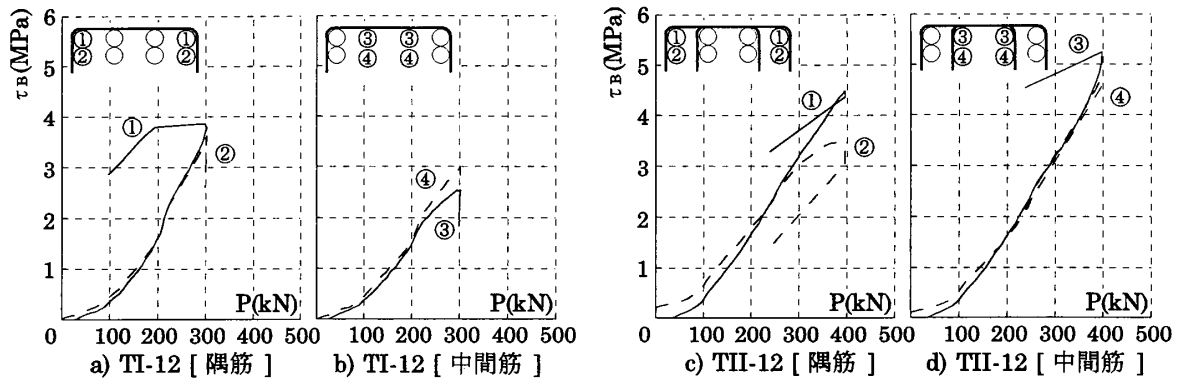


図4 縦束ねにおける各鉄筋の τ_B - P 関係

た場合では、束ねられた鉄筋の双方がともに最大耐力以降で急激な付着応力度の低下に至っている。これらの傾向は他の試験部についても同様であることから、縦束ねでは内側筋(②④)を連なるように形成される付着割裂面が付着割裂強度を決定するものと考えられる。

4. 3 付着割裂強度に及ぼす横補強筋の影響

図5に各試験部の付着割裂強度の平均値 τ_{ave} と横補強筋比 p_w の関係を示す。図にはその傾向を大まかにとらえるため、横束ねと縦束ねについてそれぞれ近似直線を示した。付着割裂強度は横束ね、縦束ね

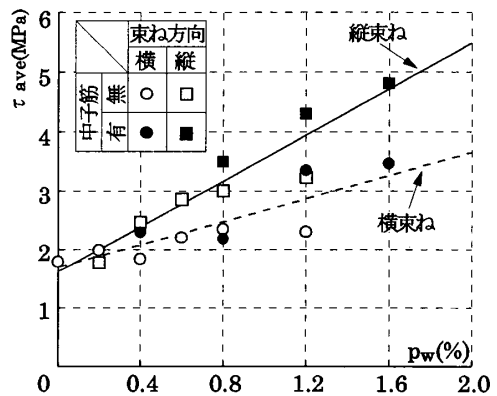


図5 τ_{ave} - p_w 関係

とも、横補強筋比に比例して上昇する傾向を示しているが、その上昇の程度は束ね方向により異なっていることが解る。縦束ねは上端筋であるにもかかわらず、下端の横束ねよりも横補強筋の効果が大きくなっており、これは同じ 2本束ね鉄筋であっても、付着に対して縦束ねの方が有利であることを示唆している。また、横束ねと縦束ねのそれぞれで中子筋の有無について比較すると、特に横補強筋比が大きい範囲では、同じ横補強筋比でも中子筋を配したもののの方が高い付着割裂強度を示しており、中子筋の効果が認められる。

4. 4 付着割裂強度の評価

図6 に各鉄筋の付着割裂強度を無次元化した $\tau_{su} / \sqrt{\sigma_B}$ と横補強筋比 p_w の関係を示す。これらは横束ねと縦束ねにおいて各々、横補強筋の隅角部に配された束ね鉄筋と横補強筋の辺上に配された束ね鉄筋とに区別することができる。このとき、横補強筋による付着割裂強度の増分は、横補強筋の隅角部に配された束ね鉄筋に比べ、横補強筋の辺上に配された束ね鉄筋で緩慢になっており、通常の配筋や重ね継手を対象とした既往の付着割裂実験[4][5]と同様の傾向を示している。

ここでは、これらを通常の配筋を対象とした藤井らの研究[6]を基礎に定式化し、束ね鉄筋の付着割裂強度の評価を試みる。藤井らの研究によれば、各鉄筋の横補強筋の効果 τ_{si} は、下端筋がサイドスプリット型の付着割裂破壊する場合に対して式(2)(3)のように表すことができる。

・横補強筋の隅角部に配された鉄筋(下端) $\tau_{si} / \sqrt{\sigma_B} = 1.22 \times 15.9A_w / (S \cdot d_b) = 38.8q_{si}$ (2)

・横補強筋の辺上に配された鉄筋(下端) $\tau_{si} / \sqrt{\sigma_B} = 1.22 \times 7.63A_w / (S \cdot d_b) = 18.6q_{si}$ (3)

ここで、 $q_{st} = b \cdot p_w / (N \cdot d_b)$ 、 b :部材幅(cm)、 N :主筋本数(本)、 d_b :主筋径(cm)、 σ_B :コンクリート強度である。また、この場合の付着割裂強度 τ_{Bu} は、横補強筋負担分 τ_{st} とコンクリート負担分 τ_{co} の累加により得られ、式(4)～(6)で算定される。

$$\tau_{Bu} = \tau_{co} + \tau_{st} \quad (4)$$

$$\tau_{co} = 1.22(0.307b_i + 0.427) \sqrt{\sigma_B} \quad (5)$$

$$b_i = (b - N \cdot d_b) / (N \cdot d_b) \quad (6)$$

ところで、これらの式は、想定した付着割裂面での鉄筋 1本当たりの拘束力を変数とした構成となっており、束ね鉄筋に本式を適用する場合にはこれを考慮した鉄筋本数 N を決定する必要がある。本論では、横束ねにおいて全鉄筋を連なるように付着割裂面が形成されたのでこれを全主筋本数 ($N=8$ 本) と置き換え、縦束ねでは内側筋を連なるように形成された付着割裂面が付着割裂強度を決定づけているものと考えられるので、これを全束ね鉄筋組数 ($N=4$ 本) と置き換えることとした。図中の実線は以上から得られた付着割裂強度である。なお、横束ねを下端鉄筋、縦束ねを上端鉄筋として算定した。横束ねでは、結局これを通常の 1段配筋とした場合と全く同じに評価されることになるが、束ねたことによる有効周長の低下傾向も見られず、実験値と計算値は良い対応を示している。一方、縦束ねでは、横補強筋の負担分 τ_{st} (傾きに相当) について計算値との対応は良いが、 τ_{co} (切片に相当) について幾分危険側となる傾向が見られる。これは内側筋位置で形成される付着割裂面に、外側筋の引張り力によるせん断力が作用したためであると考えられる。その影響を定量的に評価するのは困難であるので、ここでは暫定的に縦束ねにおける b_i に低減係数 α を乗じることとした。

$$b_i = \alpha (b - N \cdot d_b) / (N \cdot d_b) \quad \text{ただし、} \alpha : \text{低減係数}(=0.5) \quad (6')$$

点線は式(6')を用いて改めて算定したものである。実験値との適合性が向上し、横束ねとほぼ

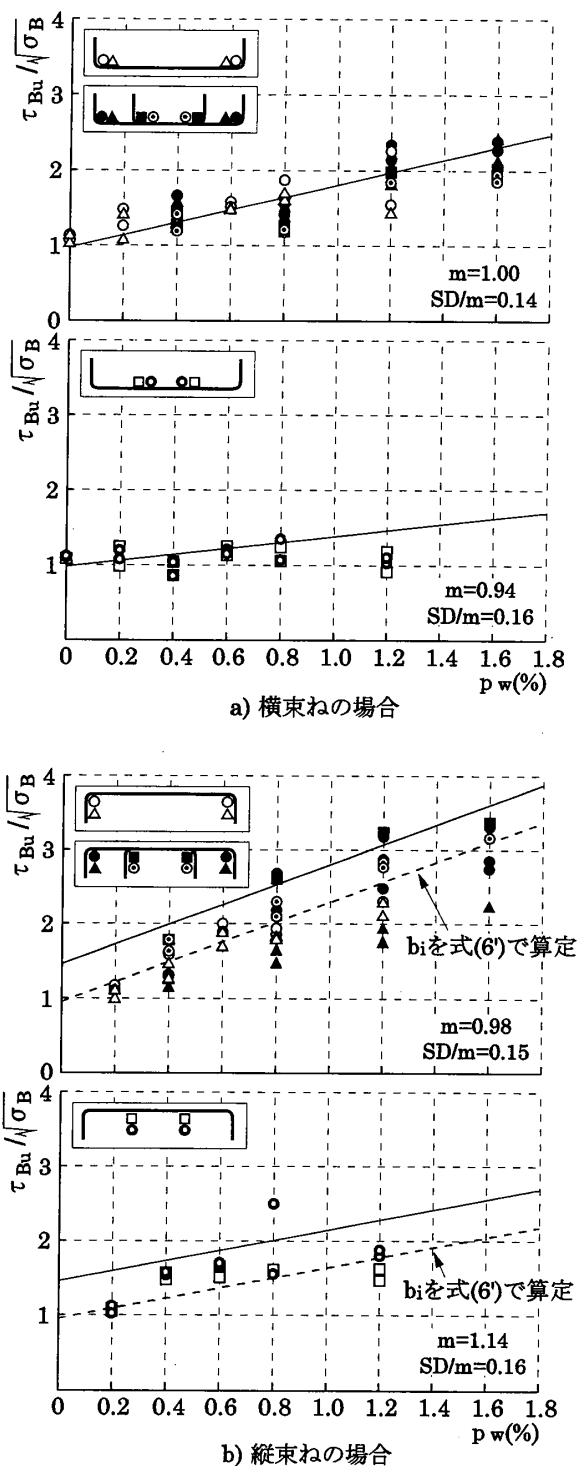


図6 $\tau_{Bu} / \sqrt{\sigma_B} - p_w$ 関係

同等の精度が得られている。これらの結果から、束ね鉄筋の部材としての付着割裂強度 τ_{Bu} は、横補強筋の隅角部に配された束ね鉄筋と辺上に配された束ね鉄筋の加重平均として以下のように表すことができる。ただし、評価式としては設計の便を考慮し、各係数を簡略化するとともに下端鉄筋を対象に基準化した。

$$\tau_u = \tau_{co} + \tau_{st} \\ = \{(0.4b_i + 0.5) + 19(n_p/N_p + 1)q_{st}\} \sqrt{\sigma_B} \quad (7)$$

ただし、

$$\text{横束ね: } b_i = b / (2N_p \cdot d_b) - 1 \quad q_{st} = b \cdot p_w / (2N_p \cdot d_b)$$

$$\text{縦束ね: } b_i = \alpha \{b / (N_p \cdot d_b) - 1\} \quad q_{st} = b \cdot p_w / (N_p \cdot d_b)$$

ここで、

n_p : 横補強筋の隅角部に配された束ね鉄筋組数(組)

N_p : 全束ね鉄筋組数(組) α : 低減係数(=0.5)

*上端については、上式に0.8を乗ずる

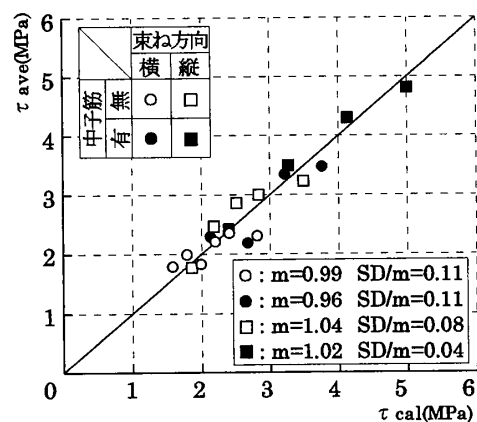


図7 実験値と計算値の対応

図7に実験値と式(7)による計算値の対応を示す。縦束ねにおける b_i の低減については今後の検討を要するものと思われるが、計算値は実験値を概ね良く評価しているものと判断される。

5. 結論

横補強筋比および中子筋の有無を変動因子とした2本束ね鉄筋の付着割裂実験を行った結果、以下の知見が得られた。

- (1) 鉄筋を部材せい方向に束ねた場合は、内側筋位置に生じる付着割裂ひび割れが部材の付着割裂強度に大きく影響する。
- (2) 中子筋は、束ね鉄筋においても通常の配筋や重ね継手の場合と同様に、付着割裂破壊に対して有効である。
- (3) 束ね鉄筋の付着割裂強度は鉄筋の束ね方向によって異なり、このうち横補強筋の効果としては鉄筋を部材幅方向に束ねるよりも部材せい方向に束ねた方が大きくなる。
- (4) 束ね鉄筋の部材としての付着割裂強度は、藤井らの研究を基礎とした式によりほぼ評価できる。このとき、横補強筋の効果は通常の配筋の場合と同等である。

参考文献

- [1] 斉藤辰彦, 土屋秀雄: 束ね鉄筋を用いたコンクリート部材, 日本建築学会論文報告集No. 171, PP1-9, 1970. 5
- [2] 小前健太郎, 細川洋治, 塩原等, 小谷俊介: 束ね鉄筋を有するRC梁の付着性状に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 18, No. 2, pp491-496, 1996
- [3] 市之瀬敏勝, 横尾慎一, 南宏一: 付着割裂強度に及ぼす主筋本数と横補強筋の効果, コンクリート工学年次論文報告集Vol13, No. 2, pp157-162, 1991. 6
- [4] 例えば, 市之瀬敏勝, 横尾慎一: 高強度コンクリートを用いたRC部材の付着割裂実験, コンクリート工学論文集No. 14-2, pp75-80, 1992
- [5] 例えば, 桜田智之, 師橋憲貴, 田中礼治: 重ね継手の付着割裂強度に及ぼす横補強筋および中子筋の効果に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集Vol. 465, pp119-128, 1994. 11
- [6] 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2報-, 日本建築学会論文報告集No. 324, pp45-53, 1983. 2