

論文 主筋を部材せい方向に重ねた全数重ね継手の付着割裂強度

田畑 卓*1・西原 寛*1・師橋憲貴*2・桜田智之*3

要旨:重ね継手に関する既往の研究のほとんどは、主筋を部材幅方向に配置した場合(横重ね)を対象としており、主筋を部材せい方向に配置した場合(縦重ね)については研究も少なく、不明な点が多い。本研究では、下端主筋に縦重ねの全数重ね継手を設けた梁型試験体を用いて、2点集中荷重による純曲げ実験を行い、主筋本数、横補強筋比および中子筋の有無が変化した場合の付着割裂強度について検討した。結果として、横重ねを対象とした既往の付着割裂強度式は本実験値に対して安全側の評価を与えるが、いずれも十分な評価とはいえず、合理的な評価とするためには、縦重ねを横重ねと区別すべきであることがわかった。

キーワード:縦重ね, 全数重ね継手, 付着割裂強度, 主筋本数, 横補強筋, 純曲げ実験

1. はじめに

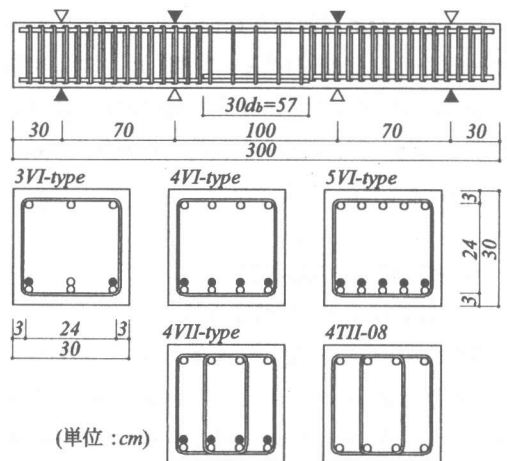
重ね継手は、相互の主筋を部材幅方向に配置する(以下、横重ね)のが一般的であるが、このほかに近年の薄肉プレキャスト工法などでみられるような、双方の主筋を部材せい方向に配置する方法(以下、縦重ね)も考えられる。縦重ねには横重ねと比べて部材の断面幅を小さくできるという利点もある。縦重ねとした場合の付着割裂強度は、日本建築学会刊行の「重ね継手の全数継手設計指針(案)・同解説」において横重ねと同様に評価すれば安全側になるとされており、特に縦重ねと横重ねは区別されていない。このような評価に留めたのは、既往の研究のほとんどが横重ねを対象としたもので、縦重ねに関する研究が少ないためであると考えられる。

そこで本研究では主筋を部材せい方向に重ねた全数重ね継手の付着割裂強度について、主筋本数、横補強筋比、中子筋の有無を変動因子とする実験を行った。実験は付着割裂強度を評価する上で基礎となる純曲げ応力下で行った。

2. 試験体および実験方法

2.1 試験体および使用材料

図-1に試験体の形状および配筋例を、表-1に試験体の一覧を示す。試験体は主筋に D19 を用いた $b \times D=30 \times 30\text{cm}$ の矩形断面の梁である。主筋は上端を通し配筋とし、下端には通し配筋の試験体 1 体を除く全てにおいて、継手長さ $30d_b$ (d_b : 主筋径)の全数重ね継手を設けている。各試験体では、曲げ降伏以前に付着割裂破壊するよう主筋に高強度鉄筋 SD685 を用いた。なお、側面および底面方向の主筋の被り厚さは 3cm でサイドスプリット型の付着割裂破壊を指向している。



(単位 : cm)

図-1 試験体の形状および配筋例

*1 安藤建設(株)技術研究所(正会員)

*2 日本大学助手 生産工学部建築工学科、工修(正会員)

*3 日本大学教授 生産工学部建築工学科、工博(正会員)

試験体の種別は主筋を 3-D19, 4-D19, 5-D19 とした 3 種類に大別される。これらの試験体では各々横補強筋を配さず $p_w=0\%$ としたものと、断面外周にのみ横補強筋を配し $p_w=0.4, 0.8, 1.2\%$ としたもの (3VI タイプ, 4VI タイプ, 5VI タイプ) がある。加えて主筋を 4-D19 としたものでは中子筋を併用し $p_w=0.8, 1.2, 1.6\%$ としたもの (4VII タイプ) を計画した。さらに、主筋を 4-D19 としたものでは重ね継手の有無による初期剛性とひび割れ性状の影響を比較するため、重ね継手を設けずに通し配筋とした 4TII-08 ($p_w=0.8\%$) を 1 体を計画した。

表-2 に使用材料の力学的性質を示す。横補強筋は D10 (SD295) による溶接閉鎖型とした。コンクリートは設計基準強度 $F_c=24\text{MPa}$ の早強コンクリートとし、打設は断面上方向から行った。

2.2 加力および計測方法

加力は重ね継手が純曲げ応力を受ける 2 点集中荷重の正負繰り返し載荷とした。加力の制御は付着割裂破壊による明らかな耐力低下が認められるまで荷重制御により行い、通し配筋の 4TII-08 では主筋の降伏以降を变形制御により行った。加力の履歴は継手端の主筋応力が 98MPa の倍数となる荷重階で各 1 回繰り返すこととした。なお、継手端の応力は曲げ略算式を用いて荷重から逆算して求めた。計測は梁中央のたわみについて行ったほか、主筋および横補強筋の主要な箇所に至みゲージを貼付し、その歪みを計測した。また、純曲げ区間では、側面の主筋重心位置における曲げひび割れ幅をマイクロSCOPE (最小目盛り 0.02mm) により測定した。

3. 実験結果および検討

3.1 破壊性状および履歴性状

図-2 に最終ひび割れ状況例を示す。重ね継手を設けた試験体では、曲げひび割れが発生した後、他方の上側に重ねられた主筋 (以下、上側筋) の継手始点位置に付着割裂ひび割れが発生し、これが継手内部へ進展することによって最大耐力に至った。試験体底面には曲げひび割れのほか、主筋に沿う付着割裂ひび割れもみられたが、側面に発

表-1 試験体一覧

試験体	主筋	継手長さ	横補強筋		
			p_w (%)	配筋	間隔 (cm)
1) 3VI-00	3-D19	$30d_b$ (57cm)	0	2-D10	—
2) 3VI-04			0.4		12
3) 3VI-08			0.8		6
4) 3VI-12			1.2		4
5) 4VI-00	4-D19		0	4-D10	—
6) 4VI-04			0.4		12
7) 4VI-08			0.8		6
8) 4VI-12			1.2		4
9) 4VII-08			0.8		12
10) 4VII-12			1.2		8
11) 4VII-16			1.6		6
12) 4TII-08			通し配筋		0.8
13) 5VI-00	5-D19	$30d_b$ (57cm)	0	2-D10	—
14) 5VI-04			0.4		12
15) 5VI-08			0.8		6
16) 5VI-12			1.2		4

表-2 使用材料の力学的性質

a) 鉄筋

種別	使用箇所	降伏強度 (MPa)	降伏歪み (%)	引張強度 (MPa)	ヤング係数 (GPa)
D19	主筋	709	0.40	917	177
D10	外周補強筋	—	—	576	181
D10	中子筋	359	0.20	515	181

b) コンクリート

圧縮強度 (MPa)	割裂強度 (MPa)	スランプ (cm)	W/C (%)	単位量 (kg/cm ³)			
				セメント	水	砂	砂利
23.4	2.45	18.0	72.3	260	188	972	827

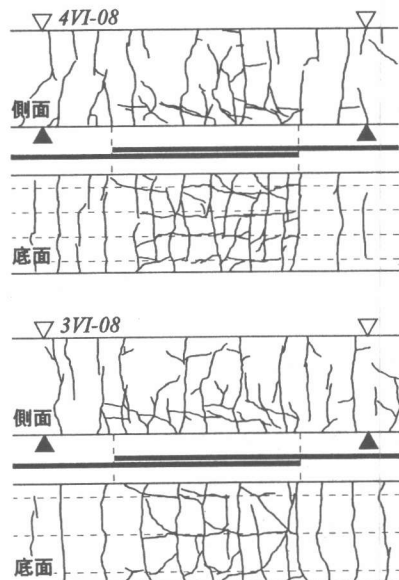


図-2 最終ひび割れ状況例

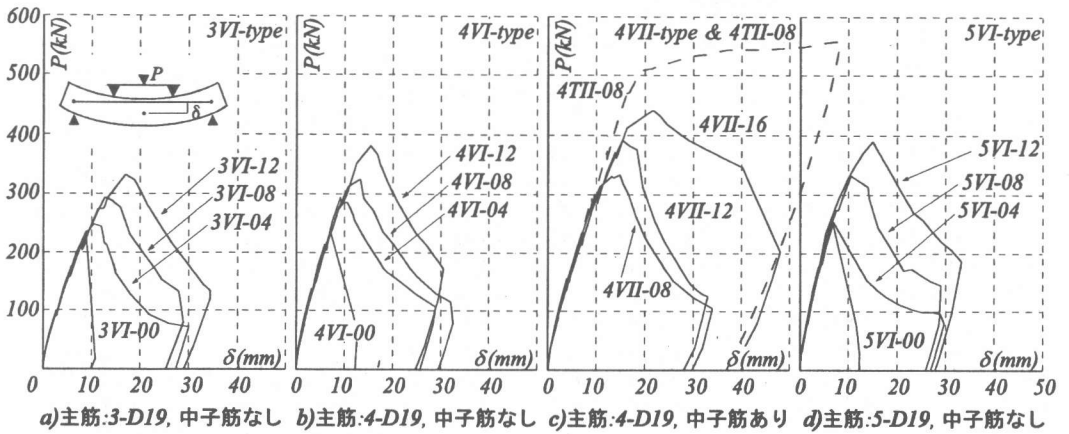


図-3 荷重P—梁中央たわみ δ 関係

生じた付着割裂ひび割れと比べ軽微であり、各試験体の破壊形式はサイドスプリット型の付着割裂破壊であると判断される。なお、いずれの試験体も主筋の降伏は認められなかった。一方、通し配筋の4TII-08では主筋の降伏以降、大変形時に上端でコンクリートが圧壊し始めたが、最終加力(=3 δ_y , δ_y :降伏変位)まで耐力が上昇し続けた。

図-3は正加力時(下端引張り時)における荷重 P と梁中央たわみ δ の関係を包絡線で示したものである。重ね継手を設けた試験体は、いずれも最大耐力以降で急激に耐力が低下している。特に $p_w=0\%$ の試験体でこの傾向が顕著である。最大耐力は主筋 3 本の 3VI タイプ、4 本の 4VI および 4VII タイプ、5 本の 5VI タイプのいずれも横補強筋比の増加に従って上昇している。横補強筋比を共通とした試験体相互では、主筋本数を増すほど最大耐力が上昇しているものの、その程度は僅かであり、主筋間のあきの減少による付着割裂強度の低下が推察される。4VI-08 と 4VII-08 および 4VI-12 と 4VII-12 は、横補強筋比が等しく中子筋の有無のみ異なる試験体であるが、最大耐力には中子筋による明らかな違いは認められない。初期剛性は、主筋 4 本の 4VI-08, 4VII-08, 4TII-08 でほぼ一致しており、重ね継手の有無、中子筋の有無による影響はみられない。

3.2 曲げひびわれ性状

図-4に各試験体の長期荷重時(重ね継手端の

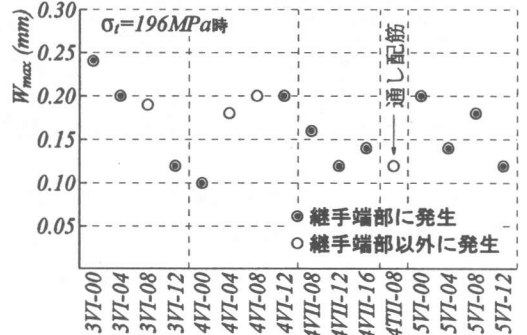


図-4 長期荷重時の最大曲げひびわれ幅 W_{max}

主筋応力 $\sigma_t=196\text{MPa}$ の最大曲げひびわれ幅 W_{max} を示す。ここでは重ね継手端を中心とする 100mm の範囲を継手端部と定義している。曲げひび割れ幅が最大となるのはほとんどの試験体において継手端部であり、それ以外の試験区間では軽微なひび割れが発生するに留まった。重ね継手を設けた試験体の W_{max} は、概ね通し配筋の 4TII-08 の W_{max} を幾分上回っているが、 W_{max} の範囲は 0.10 ~ 0.24mm で鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説のひびわれ幅の許容範囲内($W_{max} \leq 0.3\text{mm}$)に収まっている。これらは既往文献 1)における重ねの $W_{max}(=0.10 \sim 0.22\text{mm})$ と比較して大差なく、重ね形式による違いは認められない。また、主筋本数 4 本の試験体に注目すると、中子筋のない 4VI タイプに比べ中子筋を配した 4VII タイプで W_{max} が小さくなる傾向がみられる。

3.3 各主筋の付着性状

表-3 実験結果一覧

試験体	最大耐力 (kN)	付着割裂強度実験値 τ_{Bu} (MPa)							
		下側筋				上側筋			
		A	B	C	平均	①	②	③	平均
1) 3VI-00	235	3.54	4.09	—	3.72	3.93	4.31	—	4.06
2) 3VI-04	254	4.03	4.13	—	4.07	4.48	4.58	—	4.51
3) 3VI-08	298	4.60	4.26	—	4.49	5.38	4.33	—	5.03
4) 3VI-12	332	5.35	4.75	—	5.15	6.38	5.14	—	5.97
5) 4VI-00	253	2.92	2.89	—	2.90	3.33	3.35	—	3.34
6) 4VI-04	287	3.71	3.35	—	3.53	3.98	3.67	—	3.82
7) 4VI-08	326	4.36	3.52	—	3.94	4.70	3.78	—	4.24
8) 4VI-12	381	4.98	4.16	—	4.57	5.45	4.78	—	5.12
9) 4VII-08	333	3.31	4.80	—	4.06	3.49	5.33	—	4.41
10) 4VII-12	391	4.55	4.95	—	4.75	5.03	5.44	—	5.24
11) 4VII-16	446	4.76	6.20	—	5.48	5.61	5.32	—	5.47
12) 4TII-08	558	—	—	—	—	—	—	—	—
13) 5VI-00	253	2.44	2.45	2.34	2.42	2.70	2.98	2.80	2.83
14) 5VI-04	270	3.00	2.58	2.03	2.64	3.10	2.82	2.61	2.89
15) 5VI-08	351	3.63	3.34	2.95	3.38	4.12	3.83	3.54	3.89
16) 5VI-12	391	3.98	3.47	3.13	3.61	4.52	3.99	3.18	4.04

① A	② B	① A	① A	② B	② B	① A	① A	② B	② B	① A
3VI 試験体			4VI & 4VII 試験体				5VI 試験体			

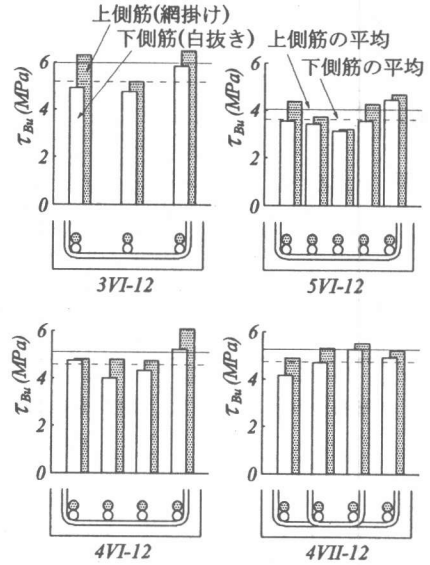


図-5 各主筋の付着割裂強度 τ_{Bu}

表-3に実験結果の一覧を、図-5に各主筋の付着付着割裂強度 τ_{Bu} を例示する。 τ_{Bu} は最大耐力時の各主筋の平均付着応力度であり、式(1)を用いて求めた。

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

ここで、 a_t :主筋断面積(mm²)、 E_s :ヤング係数(GPa)、 ϵ_t :最大耐力時の継手始点の歪み、 ϕ :主筋周長(mm)、 L_s :重ね継手長さ(mm)

図-5に例示した試験体はいずれも $p_w=1.2\%$ である。3VI-12,4VI-12,および 5VI-12 のように中子筋を配していない試験体では、外周の補強筋が直接掛かる隅主筋に比べ、直接掛からない中主筋で τ_{Bu} が低くなる傾向がみられた。これに対し、中子筋を配した 4VII 試験体では、中主筋の τ_{Bu} が隅主筋の τ_{Bu} と同程度以上まで向上しており、中主筋に対する中子筋の効果が認められる。しかしながら、隅主筋と中主筋の τ_{Bu} の平均値で見れば、中子筋の有無のみ異なる試験体、例えば 4VI-12 と 4VII-12 とではほぼ同程度であり、部材の付着耐力に与える中子筋の効果は明確ではない。一方、主筋本数のみ異なる 3VI-12,4VI-12,および 5VI-12 で

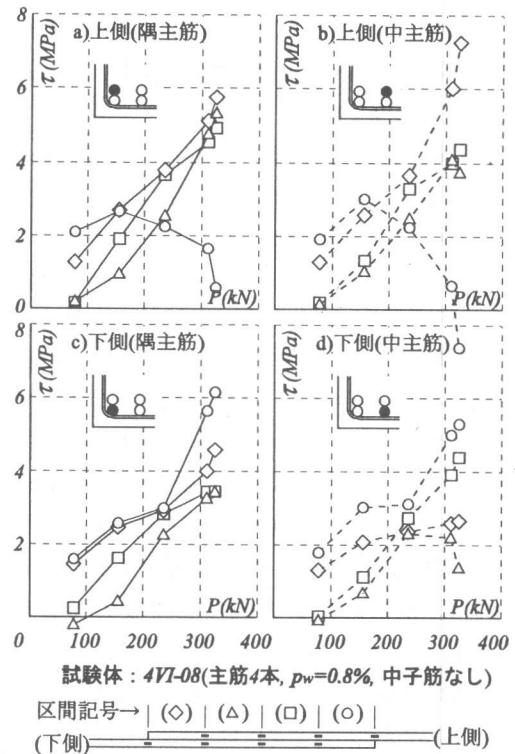


図-6 各歪み測定区間の付着応力度 τ の推移

は、主筋本数が減るほどに τ_{Bu} の平均値が増加しており、主筋間のあきの影響が認められる。

図-6は試験体 4VI-08 の各歪み測定区間にお

ける付着応力度 τ と荷重 P の関係を主筋別に示したものである。図 c),d)に示す下側筋(重ね継手部で他方の下側となる主筋)では、付着応力度 τ はいずれの区間も最大耐力まで漸増しているが、図 a),b)に示す上側筋では、継手始点に相当する○区間の τ がある荷重階から明らかに低下する傾向がみられた。この傾向は主筋本数および横補強筋比の異なる他の試験体についても同様であり、付着割裂破壊は上側筋の継手始点付近からの付着劣化によって生じたものと考えられる。

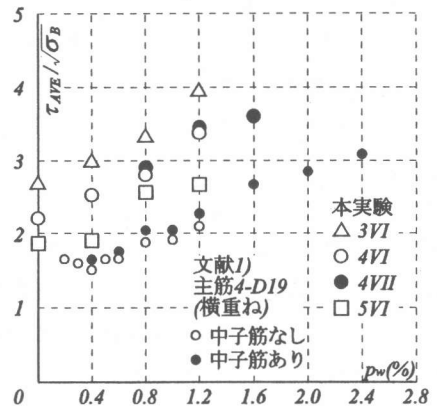


図-7 $\tau_{AVE}/\sqrt{\sigma_B} - p_w$ 関係

4. 付着割裂強度の検討

4.1 各試験体の付着割裂強度

図-7に $\sqrt{\sigma_B}$ (σ_B :コンクリート圧縮強度)で無次元化した各試験体の付着割裂強度 $\tau_{AVE}/\sqrt{\sigma_B}$ と横補強筋比 p_w の関係を示す。 τ_{AVE} は先の考察から上側筋が付着割裂破壊を決定するものと考え、上側筋の個々の付着割裂強度を平均して求めた。付着割裂強度は 3VI,4VI,4VII,5VI タイプとも概ね横補強筋比に比例して上昇している。また、同一横補強筋比では主筋本数の少ない試験体ほど付着割裂強度が高く、主筋間のあきの影響が認められる。図には横重ねを対象とした文献 1)の実験値も併せて示しているが、これと主筋本数を等しくした 4VI,4VII タイプでは、文献 1)と比べて $p_w=0\%$ の

きの付着割裂強度が高く、横補強筋による付着割裂強度の上昇の程度も僅かながら大きくなる傾向を示している。

4.2 既往の付着割裂強度式との対応

図-8に重ね継手を対象とした既往の付着割裂強度式と本実験値および文献 1)の実験値との対応を示す。桜田らの式は文献 1)の実験結果から導かれた式であり、本実験値に対する(実験値)/計算値)の平均が $m=1.73$ で 3 式中、最も安全側の評価を与えている。角陸の式²⁾は本実験結果と比較的よい対応を示しているが、文献 1)の横重ねに対して特に横補強筋の効果を過大評価する傾向がみられる。桜田らの式と角陸の式は横重ねを対象

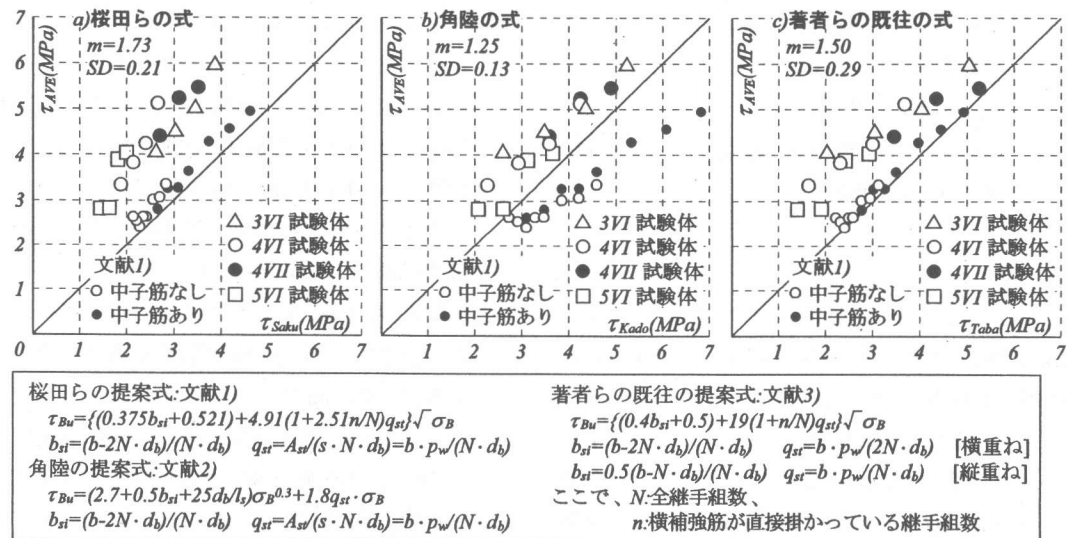


図-8 既往の付着割裂強度式と実験値の対応

としており、この結果は縦重ねと横重ねを区別して評価すべきであることを示唆している。著者らの既往の式³⁾では縦重ねと横重ねを区別するが、(実験値)/(計算値)の平均および標準偏差が $m=1.50, SD=0.29$ で必ずしも妥当な評価ではない。ここで、文献 1)の実験結果とよい対応を示している桜田らの式、著者らの式に注目すると、両式の縦重ねに対する横補強筋の効果 τ_{st} の評価は異なるものの、本実験値は両式の計算値に対してほぼ一様に安全側へシフトするよう分布しており、 $p_w=0\%$ のときの付着割裂強度(コンクリート負担分 τ_{co})を過小評価することが実験値との適合性を低下させている大きな要因であると判断される。そこで、本実験におけるコンクリート負担分 τ_{co} について検討を試みた。

図-9はコンクリート負担分を $\sqrt{\sigma_B}$ で無次元化した $\tau_{co}/\sqrt{\sigma_B}$ とその尺度 b_{si} の関係を示している。なお、 $\tau_{co}/\sqrt{\sigma_B}$ の実験値は、図-7において付着割裂強度と横補強筋比が比例関係にあると判断して主筋本数別の回帰直線を求め、その切片値を用いた。また、実験値の b_{si} は、上側筋のみ連なる付着割裂面を想定し、便宜的に藤井・森田式⁴⁾の b_{si} における主筋本数 N を継手組数に置き換えて評価した。図より本実験の $\tau_{co}/\sqrt{\sigma_B}$ と b_{si} は比例関係にあることがわかる。このとき実験値を直線回帰して得た図中の実線は、 b_{si} による $\tau_{co}/\sqrt{\sigma_B}$ の増減の程度(直線の傾きに相当)が、既往の付着割裂強度式(点線と2点鎖線で図示)とほぼ一致している。しかしながら、実験値は計算値を全体に上回っており、この点については今後、データの蓄積とともに検証を図る必要があると思われる。

5. 結論

主筋を部材せい方向に重ねた全数重ね継手(縦重ね)を対象として付着割裂実験を行った結果、以下の知見が得られた。

- 1)長期荷重時における最大曲げひびわれ幅は、いずれも 0.24mm 以下で RC 規準の許容範囲内に収まった。また、初期剛性に重ね継手の有無による影響は認められなかった。

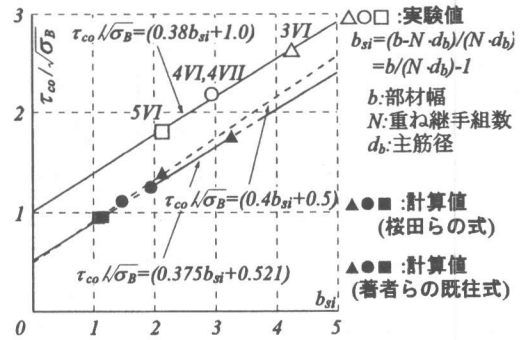


図-9 コンクリート負担分 $\tau_{co}/\sqrt{\sigma_B}$ - b_{si} 関係

- 2)縦重ねでは断面の上側に位置する主筋(上側筋)の継手始点から付着劣化する。
- 3)コンクリート負担分 $\tau_{co}(p_w=0\%$ 時の付着割裂強度)は、主筋本数の減少とともに増加し、主筋本数を継手組数に置き換えて評価した $b_i(=b/(N \cdot d_b) - 1)$ と比例関係にある。
- 4)中主筋の付着割裂強度は中子筋を配することによって向上したが、隅主筋と中主筋の付着割裂強度による平均では、中子筋の有無による付着割裂強度の違いが明確ではなかった。
- 5)重ね継手を対象とした既往の付着割裂強度式は、本実験値に対して安全側の評価を与えるが、いずれも十分な評価とはいえない。

参考文献

- 1)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研究,日本建築学会構造系論文集,第465号,pp.119-128,1994.11
- 2)角陸純一:高強度鉄筋コンクリート部材中の重ね継手の付着割裂強度に関する研究,清水建設研究報告,第60号,pp.29-39,1994
- 3)田畑卓・西原寛・松本智夫・鈴木英之:束ね鉄筋の付着割裂強度に関する研究,構造工学論文集,Vol.43B,pp.211-220,1997.3
- 4)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 付着割裂強度算定式の提案),日本建築学会論文報告集,第324号,pp.45-52,1983.2