

論文 コンクリート強度の異なる重ね継手の付着割裂強度に関する研究

師橋 憲貴*1・桜田 智之*2

要旨: 本研究は重ね継手の付着割裂強度とコンクリート強度の関係を検討したものである。付着割裂強度の検討にあたっては筆者らが行った実験の結果に加え、高強度コンクリートを使用した重ね継手の実験が多数行われている国外の実験結果も用いた。筆者らが誘導した付着割裂強度式を基に付着割裂強度の評価を行った結果、付着割裂強度の内のコンクリート負担分はコンクリート強度が 60N/mm^2 級まではコンクリート強度の平方根に比例する傾向がみられた。また筆者らが誘導した付着割裂強度式による計算値は実験値に対して良好な適合性のあることが認められた。

キーワード: 重ね継手, 付着割裂強度, コンクリート強度

1. はじめに

本研究は重ね継手の付着割裂強度とコンクリート強度の関係を検討したものである。実験はコンクリート強度が 50N/mm^2 級である重ね継手の付着実験を行った。また筆者らが行ったコンクリート強度が 20N/mm^2 級, 60N/mm^2 級の既往の実験結果¹⁾を加え、コンクリート強度が変化した場合の付着割裂強度と重ね継手長さの関係を検討した。更に付着割裂強度と横補強筋比の関係についてもコンクリート強度の相違でどのように異なるのか検討を行った。

一方既往の研究でコンクリート強度が高くなると付着割裂強度は増加することが知られているが、コンクリート強度の増加に対する付着割裂強度の増加の程度がどれ程であるかについては、特に横補強筋の効果を含めた場合では既往の研究が限られており不明な点が多い。そこで本研究では筆者らの実験結果に高強度コンクリートを使用した重ね継手の実験が多数行われている国外の実験結果を加え、付着割裂強度がコンクリート強度とどのような関係にあるのか検討を行った。コンクリート強度については既往の研究で付着割裂強度はコンクリート強度の平方根に比例するとの考えが多いことから、コンクリート強度の平方根を用いて評価した場合とコ

ンクリート強度に掛かる次数を指定しない場合に分けて検討を行った。

次いで筆者らが誘導した付着割裂強度式を構成する定数を基にした付着割裂強度の評価を行い、コンクリート強度が重ね継手の付着割裂強度に及ぼす影響について検討を行った。

2. 実験概要

図-1に試験体形状を、また図-2に試験体断面図を示す。試験体は単純ばり形式で、主筋

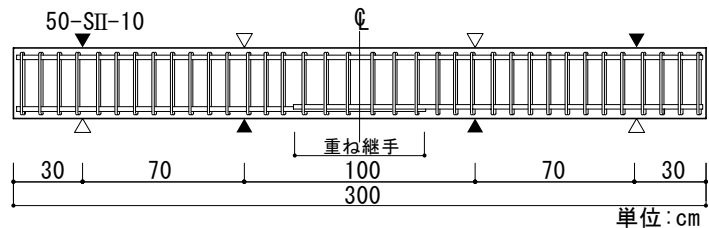


図-1 試験体形状

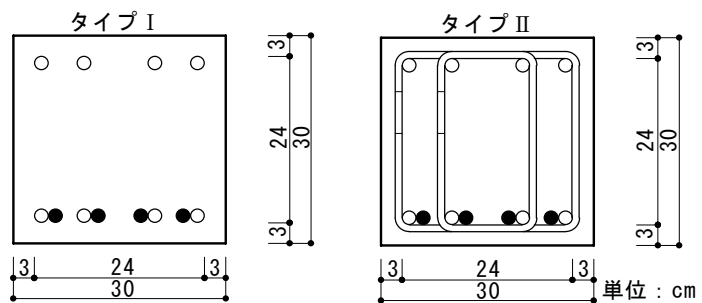


図-2 試験体断面

*1 日本大学助手 生産工学部建築工学科 工修 (正会員)

*2 日本大学教授 生産工学部建築工学科 博士(工学) (正会員)

表－1 試験体詳細一覧

試験体名		重ね継手長さ		横補強筋	横補強筋本数 (本)	横補強筋間隔 S (cm)	横補強筋比 pw (%)
		ndb	l_s (cm)				
1	50-S I - 20	20db	38.0	-	-	-	0.0
2	50-S I - 25	25db	47.5				
3	50-S I - 30	30db	57.0				
4	50-S I - 35	35db	66.5				
5	50-S I - 40	40db	76.0				
6	50-S I - 45	45db	85.5				
7	50-S II - 04	30db	57.0	4-D10	3	24.0	0.4
8	50-S II - 06				4	16.0	0.6
9	50-S II - 08				5	12.0	0.8
10	50-S II - 10				6	9.6	1.0
11	50-S II - 12				7	8.0	1.2

は上端および下端とも 4-D19 (SD685, $\sigma_y = 704 \text{ N/mm}^2$, $E=1.80 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$)を用いて断面に対して水平に重ねた重ね継手を純曲げ区間の下端に設けた。主筋表面からのかぶり厚さは底面と側面ともに $3\text{cm}(1.6d_b, d_b:公称径)$ としサイドスプリット型の付着割裂破壊を対象とした。横補強筋にはD10(SD295A, $\sigma_y=350 \text{ N/mm}^2$, $E=1.83 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$)を使用し、形状は重ね溶接の閉鎖型とした。横補強筋の配筋は2タイプからなり、タイプIでは重ね継手区間に横補強筋を配筋せず($pw=0\%$)、重ね継手の付着割裂強度をコンクリートのみの負担分に限定して検討した。またタイプIIでは外周横補強筋に中子筋を組合わせて重ね継手区間に配筋し(4-D10)、重ね継手の付着割裂強度の内の横補強筋による付着割裂強度増分について検討した。表－1に試験体詳細一覧を示す。試験体数は合計11体である。重ね継手長さ l_s はタイプIでは $l_s=20d_b \sim 45d_b$ まで $5d_b$ ずつ6種類に変化させ、付着割裂強度に及ぼす重ね継手長さの影響を検討した。タイプIIでは重ね継手長さは $30d_b$ と一定にして、横補強筋比 pw を $pw=0.4\% \sim 1.2\%$ まで 0.2% ずつ5種類に変化させた。

加力は2点集中加力による純曲げ実験で正負繰返し载荷を行った。変位は加力点および中央におけるはりの相対変位を測定した。重ね継手の付着割裂破壊発生以前は荷重制御とし、付着割裂破壊発生後ははり中央の変位により制御した。

3. 付着割裂強度の検討

表－2に実験結果一覧を示す。本実験の実験時のコンクリート強度は $\sigma_B=55.8\text{N/mm}^2$ であった。重ね継手の破壊形式は主筋の降伏が確認された50-S II-12を除きすべて曲げ降伏以前のサイドスプリット型の付着割裂破壊であった。付着割裂強度の評価は本実験結果に加え、試験体の形状および配筋が本実験と同様でコンクリート強度の異なる既往の実験結果¹⁾を合わせて検討を行った。既往の実験のコンクリート強度は 20N/mm^2 級の試験体では $\sigma_B=23.7\text{N/mm}^2$ と 26.2N/mm^2 、また 60N/mm^2 級の試験体では $\sigma_B=63.9\text{N/mm}^2$ である。付着割裂強度 $\tau_{u \text{ exp.}}$ は最大荷重を基に式(1)により求め、最大平均付着応力度で評価を行った。

$$\tau_{u \text{ exp.}} = \frac{Mu}{j \cdot \phi \cdot l_s} \quad (\text{N/mm}^2) \quad \dots \dots (1)$$

ここで Mu:最大曲げモーメント
 j : $7/8d$ (d:はり有効せい)
 ϕ :鉄筋の周長
 l_s :重ね継手長さ

図－3にタイプIの付着割裂強度 $\tau_{u \text{ exp.}}$ と重ね継手長さ係数 l_s/d_b の関係を示す。同一コンクリート強度の試験体を比較すると重ね継手長さが短くなるにつれて付着割裂強度は徐々に増加する傾向が認められた。また同一重ね継手長さの試験体を比較するとコンクリート強度が高

表-2 実験結果一覧

試験体名		コンクリート強度 σ_B (N/mm^2)	最大荷重 P_{max} (kN)	付着割裂強度 $\tau_{u exp.}$ (N/mm^2)	破壊形式
1	50-S I - 20	55.8 水セメント比:39.5% スランブ:16.0cm 割裂強度:3.68 N/mm^2	244.5	4.12	B
2	50-S I - 25		287.5	3.87	
3	50-S I - 30		333.5	3.74	
4	50-S I - 35		389.0	3.74	
5	50-S I - 40		397.6	3.35	
6	50-S I - 45		418.5	3.13	
7	50-S II - 04		374.6	4.20	
8	50-S II - 06		452.0	5.07	
9	50-S II - 08		482.2	5.41	
10	50-S II - 10		476.6	5.35	
11	50-S II - 12		548.6	-	FB

B:付着割裂破壊

FB:曲げ降伏後の付着割裂破壊

くなると付着割裂強度は増加する傾向が認められた。

図-4にタイプIIの付着割裂強度 $\tau_{u exp.}$ と横補強筋比 pw の関係を示す。なおコンクリート強度が高い場合に $pw=1.2\%$ の試験体では曲げ降伏後に付着割裂破壊したため図-4では除いて示した。同一コンクリート強度の試験体を比較すると横補強筋比が大きくなるにつれて付着割裂強度はほぼ比例して増加する傾向が認められ、付着割裂強度に及ぼす横補強筋の効果が確認された。また同一 pw の試験体を比較するとコンクリート強度が $\sigma_B=26.2N/mm^2$ の $\tau_{u exp.}$ に対して $\sigma_B=55.8N/mm^2, 63.9N/mm^2$ の $\tau_{u exp.}$ は大きい値を示しているが、コンクリート強度の高い $\sigma_B=55.8N/mm^2$ と $63.9N/mm^2$ とを比較すると横補強筋比の大きい試験体で σ_B の小さい試験体の方が $\tau_{u exp.}$ が大きくなる場合があった。図-3の $pw=0\%$ の試験体ではコンクリート強度の高い $63.9N/mm^2$ は $\sigma_B=55.8N/mm^2$ に比べどの重ね継手長さにおいても付着割裂強度が大きい値を示していたことから、 $60N/mm^2$ 級のコンクリート強度を超える高強度コンクリートでは $60N/mm^2$ 以下のコンクリート強度に比べ横補強筋がある場合の横補強筋による付着割裂強度の増分は小さくなり、横補強筋の効果が及ぼすコンクリート強度の効果が少なくなったものと考えられる。

4. コンクリート強度が重ね継手の付着割裂強度に及ぼす影響

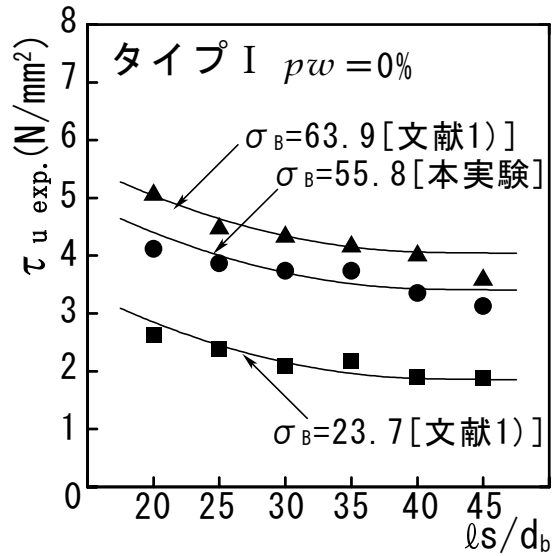


図-3 付着割裂強度と重ね継手長さの関係

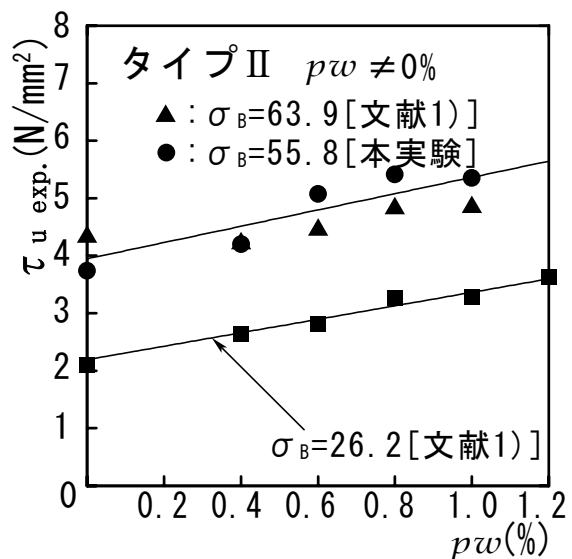


図-4 付着割裂強度と横補強筋比の関係

筆者らの実験だけではコンクリート強度の値が限られていることから、ここでは高強度コンクリートを対象とした重ね継手の付着実験も多数行われている国外の実験データを加えて、コンクリート強度と重ね継手の付着割裂強度の関係について検討を行った。

図-5および図-6に付着割裂強度とコンクリート強度の関係を示す。付着割裂強度は既往の研究で横補強筋のない場合(コンクリート負担分)と横補強筋による付着割裂強度増分(横補強筋負担分)の和で構成されるとの考えが多いことから、図-5および図-6では横補強筋比 $pw=0\%$ の試験体と $pw \neq 0\%$ の試験体に分けて示した。また、付着割裂強度はコンクリートの割裂強度に依存するとの考えからコンクリート強度の平方根($\sqrt{\sigma_B}$)に比例する形式の算定式が多い。このことから、高強度コンクリートの範囲を含めてコンクリート強度を用いた付着割裂強度の近似式を求めた場合に、コンクリート強度 σ_B に掛かる次数がどの程度になるのかを調べた。図-5および図-6中の曲線は σ_B の次数を 0.5 乗(= $\sqrt{\sigma_B}$)に指定した場合(破線)と指定しない場合(実線)の $\tau_{u \text{ exp.}}$ と σ_B の関係を最小二乗法により求めた近似線である。図-5の横補強筋のない場合($pw=0\%$)では、 $\tau_{u \text{ exp.}}$ が $\sigma_B^{0.343}$ に比例する近似線が得られた。また $\tau_{u \text{ exp.}}$ と σ_B の関係は比較的ばらつきが少なかった。一方、図-6の横補強筋のある場合($pw \neq 0\%$)では、 $\tau_{u \text{ exp.}}$ が

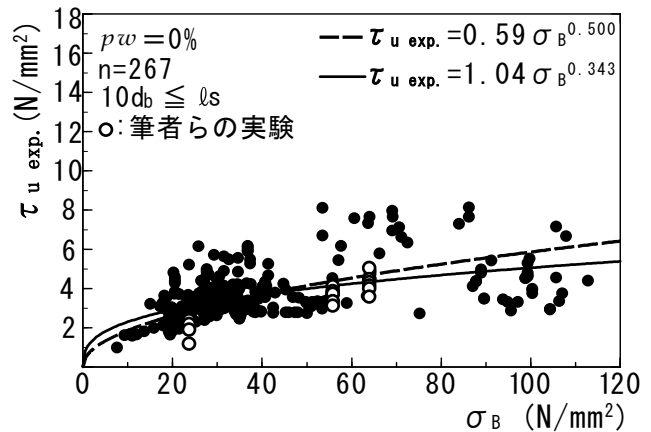


図-5 付着割裂強度とコンクリート強度の関係 ($pw=0\%$)

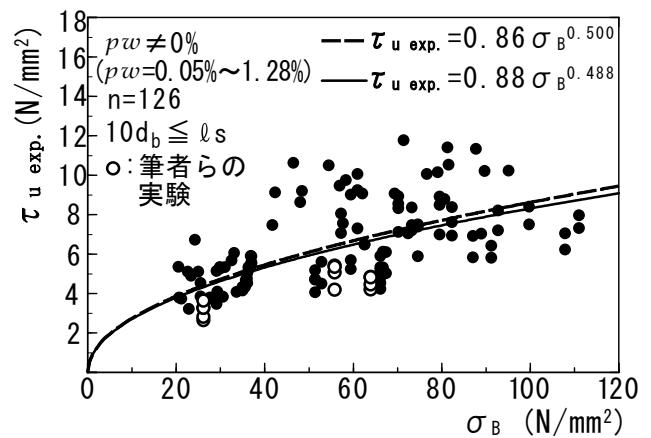


図-6 付着割裂強度とコンクリート強度の関係 ($pw \neq 0\%$)

表-3 付着割裂強度式

$\tau_{u \text{ cal.}} = \tau_{co \text{ cal.}} + \alpha \tau_{st \text{ cal.}}$ (N/mm ²) (2)	
$\tau_{co \text{ cal.}} = \{0.12 + 0.07b_{si} + 5.54 / (l_s / d_b)\} \sqrt{\sigma_B}$ (3)	
$\tau_{st \text{ cal.}} = \{1 + 2.51(n/N)\} 1.54q_{st} \sqrt{\sigma_B}$ (4)	
$b_{si} = \frac{b - \sum d_b}{\sum d_b'}$	$q_{st} = \frac{b \cdot pw}{N \cdot d_b}$	
d_b : 主筋径	l_s : 重ね継手長さ	b : はり幅
N : 全重ね継手組数		pw : 横補強筋比
n : 横補強筋が直接かかっている重ね継手組数		
$\sum d_b$: 重ね継手の主筋の直径の総和 (重ね継手の主筋1組は2本と数える)		
$\sum d_b'$: 重ね継手の外側での主筋の直径の総和 (重ね継手の主筋1組は1本と数える)		
σ_B : コンクリート強度(N/mm ²)		
但し、図-10に示す計算値の算定の際は	$\begin{cases} \sigma_B \leq 60 \text{ N/mm}^2 \text{ で } \sqrt{\sigma_B} = \sqrt{\sigma_B} \\ 60 \text{ N/mm}^2 < \sigma_B \text{ で } \sqrt{\sigma_B} = \sqrt{60} \\ \alpha = 0.7 \end{cases}$	

$\sigma_B^{0.488}$ に比例する近似線が得られたが、 $\tau_{u\text{exp.}}$ と σ_B の関係は $pw=0\%$ の場合に比べ若干ばらついた結果となった。これらのことから、筆者らが調べた範囲の 100N/mm^2 級のコンクリート強度を有する既往の重ね継手の実験結果を含めてみると、横補強筋のない場合は付着割裂強度がコンクリート強度 σ_B のおよそ 0.3 乗に比例し、また横補強筋のある場合は σ_B のおよそ 0.5 乗に比例する結果となり、図-5の横補強筋のない場合では筆者らが行ったコンクリート強度が 60N/mm^2 級の実験結果までは σ_B のおよそ 0.5 乗に比例する近似線で実験値との対応ができるが、 60N/mm^2 級のコンクリート強度を越える領域では σ_B のおよそ 0.3 乗に比例する近似線のようにコンクリート強度が高強度になる程付着割裂強度の増加が緩やかになる傾向が確認された。

5. 付着割裂強度式とコンクリート強度の関係

ここでは筆者らが文献 1) で誘導した付着割裂強度式(表-3)の中でコンクリート強度以外の定数を利用してコンクリート強度を用いた付着割裂強度の近似式を求めた場合に、コンクリート強度 σ_B に掛かる次数がどの程度になるか検討した。付着割裂強度式はコンクリート負担分を表す式(3)と横補強筋負担分を表す式(4)の和 [式(2)] で構成されている。図-7は図-5の縦軸をコンクリート負担分を算定する式(3)右辺の $\sqrt{\sigma_B}$ 以外の定数で除した値で示したものである。図中に縦軸の値とコンクリート強度の関係について最小二乗法により求めた近似式を示したが、縦軸の値は $\sigma_B^{0.499}$ に比例する結果となりコンクリート強度の平方根 ($\sqrt{\sigma_B}$) に比例する式(3)とよく合っていた。ただし、 60N/mm^2 級のコンクリート強度を超える領域では $\sigma_B^{0.499}$ を表す曲線より実験値が下回る傾向にあった。図-8は横補強筋負担分 $\tau_{st\text{exp.}}$ とコンクリート強度の関係について検討を行った図である。

$\tau_{st\text{exp.}}$ は $\tau_{u\text{exp.}}$ から式(3)の $\tau_{co\text{cal.}}$ を差し引いて求めた。図-8の縦軸は $\tau_{st\text{exp.}}$ を横

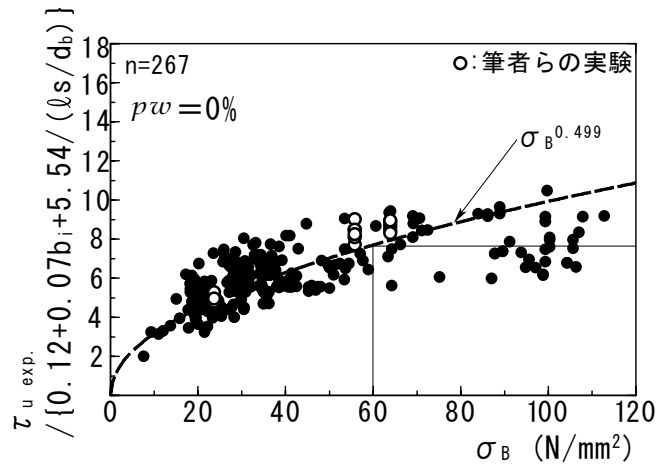


図-7 付着割裂強度 ($pw=0\%$) とコンクリート強度の関係

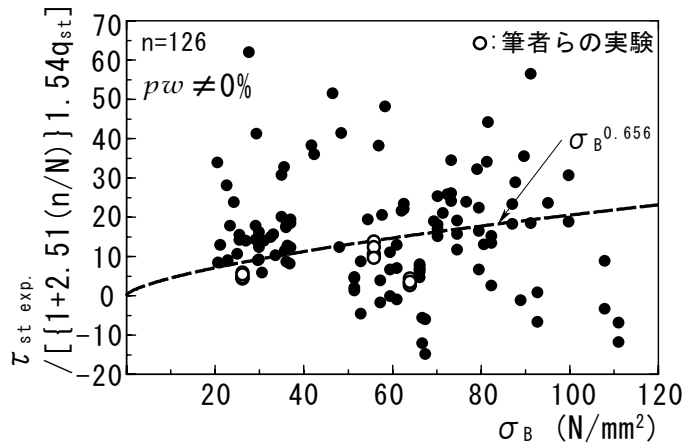


図-8 横補強筋負担分 $\tau_{st\text{exp.}}$ とコンクリート強度の関係

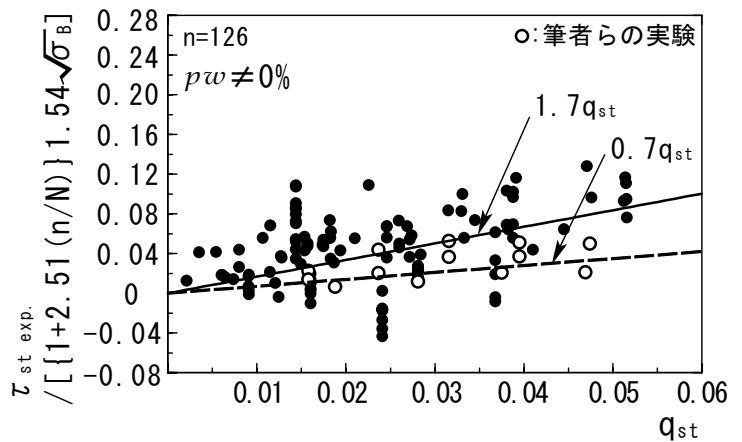


図-9 横補強筋量を評価する q_{st} と付着割裂強度増分の関係

補強筋負担分を算定する式(4)右辺の $\sqrt{\sigma_B}$ 以外の定数で除した値で示したものである。縦軸の値とコンクリート強度の関係を近似すると、縦軸の値は $\sigma_B^{0.656}$ に比例する結果となった。しかし全体として実験値はかなりばらつきがみられており、縦軸の値とコンクリート強度との相関は少ない。そこで図-9のように横軸を表-3に示した横補強筋量を評価する q_{st} で表すと、 q_{st} の増加とともに縦軸の値も増加する比例の傾向が認められた。図-9中の実線は縦軸の値と q_{st} の関係を近似した傾き(1.7 q_{st})を示したものである。また破線は60N/mm²級のコンクリート強度を対象とした筆者らの既往の実験結果より付着割裂強度式を誘導した際の近似式の傾き(0.7 q_{st} , $\alpha=0.7$)である[文献1]。コンクリート強度が60N/mm²級を越える場合には重ね継手長さが短い(10.5 d_b ~23.0 d_b)試験体が多い国外既往実験に比較して筆者らの実験は試験体の重ね継手長さが30 d_b と長く、破線の傾きは下限値に近い値を示していると考えられる。

図-10は表-3の付着割裂強度式を用いて求めた計算値と実験値の関係である。付着割裂強度算定式の適用にあたっては、図-7の考察により計算に用いる $\sqrt{\sigma_B}$ は60N/mm²を越える場合には $\tau_{co\ cal.}$ と $\tau_{st\ cal.}$ ともに $\sqrt{60}$ の一定値として実験値との関係を調べてみることにした。また図-9の考察により表-3中式(2)の横補強筋負担分に掛かる係数 α は安全側の評価となる0.7として計算を行った。図-10中に実験値を計算値で除した付着強度比 m および標準偏差 SD を示したが、 m と SD はそれぞれ $m=1.20$, $SD=0.24$ で計算値は安全側の評価となり、計算値は実験値に対して良好な適合性が認められた。

6. 結論

コンクリート強度の異なる重ね継手の付着割裂強度とコンクリート強度の関係について本実験に国外既往実験を加えて検討を行った結果、以下の知見が得られた。

- (1)筆者らの実験において横補強筋のない場合にはコンクリート強度が高くなるにつれて、また重ね継手長さが短くなるにつれて付着割裂強度が増加する傾向が認められた。一方国外既往実験を含めると横補強筋のな

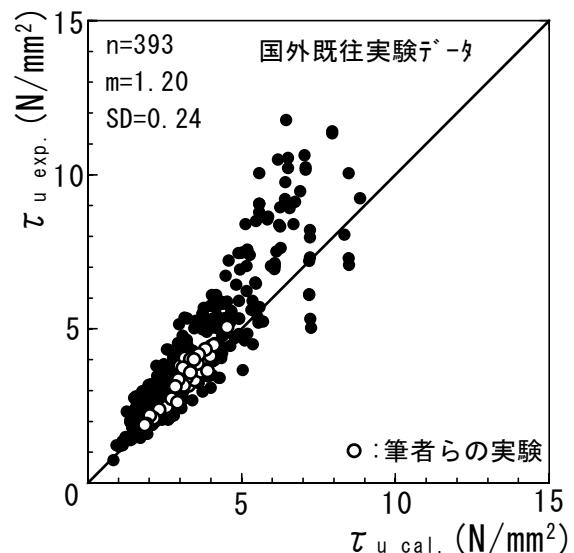


図-10 実験値と計算値の関係

- い場合の付着割裂強度は60N/mm²級のコンクリート強度を越える領域では付着割裂強度の増加が緩やかになる傾向が確認された。
- (2)筆者らが誘導した既往の付着割裂強度式を利用して付着割裂強度を評価した結果、付着割裂強度の内の横補強筋負担分 τ_{st} はコンクリート強度との関連が少なかったが、横補強筋量を評価する q_{st} との比較では比例の関係が認められた。
- (3)筆者らが誘導した既往の付着割裂強度式の適用にあたり、コンクリート強度が60N/mm²を越える場合には $\sqrt{60}$ の一定値としてコンクリート強度の評価を試みた計算値は実験値に対して良好な適合性が確認されたが、コンクリート強度が60N/mm²を越える領域でのコンクリート強度の増加にともなう付着割裂強度の増加の限界などは明らかにできておらず今後の課題としたい。

参考文献

- 1) 師橋憲貴・桜田智之:60MPa級の高強度コンクリートを用いた重ね継手の付着割裂強度に関する研究,コンクリート工学論文集,第11巻第1号,pp.9~18,2000年1月
なお、国外既往実験データが掲載されている文献については最近発表された文献では以下に挙げる例があるが、その他20件程の文献からデータを引用した。
- 2) Jun Zuo・David Darwin: Splice Strength Conventional and High Relative Rib Area Bars in Normal and High-Strength Concrete, ACI Structural Journal, pp.630~641, July-August 2000