

論文 連続繊維シートで補強された RC 部材の付着割裂破壊時のせん断耐力

松野 一成^{*1}・角 徹三^{*2}・田村 冬樹^{*3}

要旨：連続繊維シート補強による RC 部材の付着割裂破壊抑止効果の検討を，正負繰返し載荷を受けるはり型試験体の結果を用いて行うとともに，付着割裂強度算定式の評価を行った．その結果，一方向単調載荷の試験体の付着強度と比較したところ，繰返し載荷の際の付着割裂強度の劣化が確認された．また，現実の柱・はりの設計に適応するために，付着割裂破壊時のせん断力の算定法を誘導し，その評価も行った．その結果，本算定法が繰返し載荷の際の耐力低下に対応するための安全率を検討することで，実設計に充分適応可能であることが確認された．

キーワード：連続繊維シート，付着割裂強度，正負繰返し載荷，せん断耐力

1. はじめに

本報は，連続繊維シート巻き付けによる RC 部材の付着割裂破壊抑止効果についての検討を行うのものである．著者等は，キャンティレバー型試験体および簡易型試験体を用いた実験結果から連続繊維シート補強した場合の RC 部材の付着割裂強度算定式を提案した¹⁾．しかし，いずれの実験も単調載荷による実験であったため，繰返しによる付着劣化については言及されていない．そこで，繰返し載荷による付着劣化の程度を明らかにすることを目的とする．

付着割裂強度算定の実験式によって付着割裂強度は推定できるが，現実の柱・はりせん断力で評価すべきであり，強度（応力度表記）では実設計には適応できないため，付着割裂強度から RC 部材の付着割裂破壊時のせん断力（以下，付着せん断耐力と呼称する）を算定することが重要となる．このため，著者等が提案した付着割裂強度から付着せん断耐力を算定する手法について言及する．付着せん断耐力の算定にあたっては，トラス・アーチ作用に基づく方法が一般的であるため本論でもこの理論を用いることとし，2 段配筋の場合をも包含

した付着せん断耐力の算定法を試みた．

2. 逆対称載荷を受ける RC 部材の付着割裂試験 2.1 試験体

試験体の一覧表を表 - 1 に，試験体の配筋を図 - 1 に断面詳細図を連続繊維シートの貼付要領と併せて図 - 2 に示す．

試験体は，実験変数である連続繊維シート補強量以外の断面，配筋などはすべて同一である．試験区間は 1200mm，断面は 200 × 300mm，試験区間の両側に補強部（スタブ）を設け載荷における支持点あるいは反力の支持点としている．試験鉄筋（外側主筋）を直接拘束する横補強筋としては，シリーズ 1 は 2 - D10@85 ($p_{ws}=0.8\%$) を，シリーズ 2 は 2 - D10@120 ($p_{ws}=0.6\%$) を配した．断面の寸法と試験鉄筋の配置決定にあたっては，藤井・森田式²⁾に従えばサイドスプリット型の付着割裂破壊が先行するよう留意されている．

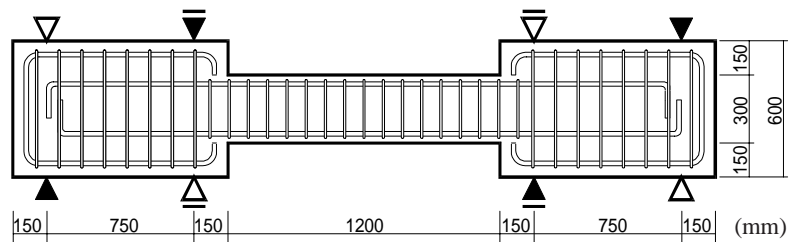


図 - 1 試験体図

*1 呉工業高等専門学校助手 建築学科 博士（工学）（正会員）

*2 豊橋技術科学大学教授 建設工学系 工学博士（正会員）

*3 豊橋技術科学大学大学院 工学研究科建設工学専攻

表 - 1 試験体一覧表

シリーズ	試験体名	断面形状 (mm)	主筋		横補強筋			連続繊維シート		目標コンクリート強度 (N/mm ²)
			本数・径	降伏点 (N/mm ²)	本数・径	補強比 P _{ws} (%)	降伏点 (N/mm ²)	種類	補強比 P _{wf} (%)	
1	B9	200 × 300	4-D19	436	2-D10	0.8	383	-	0	30
	B10							炭素	0.08	
	B11							炭素	0.16	
	B12							-	0	
2	B13		4-D19	384	2-D10	0.6	383	-	0	30
	B14							炭素	0.08	
	B15							-	0	
	B16							炭素	0.08	
	B17	炭素						0.16		

2.2 使用材料の性質

(1) コンクリート

使用したコンクリートの配合を表 - 2 に示す。粗骨材は最大粒径 20mm，目標スランプ 15cm，目標コンクリート強度 30N/mm² とした。また，コンクリートの力学的性質を表 - 3 に示す。同一配合にもかかわらず打設時期，気温等が異なったため，表のような強度差が生じている。

表 - 2 コンクリート配合表

W/C (%)	S/A (%)	セメント (kg/m ³)	水 (kg/m ³)	細骨材 (kg/m ³)	粗骨材 (kg/m ³)	混和剤 (kg/m ³)
48.0	44.2	367	176	779	988	0.734

表 - 3 コンクリートの力学的性質

	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)
1 シリーズ	30.4	4.33	1.86 × 10 ⁴
2 シリーズ	29.1	5.04	1.88 × 10 ⁴
	36.8	5.90	1.90 × 10 ⁴

(2) 鉄筋

使用した鉄筋の力学的性質を表 - 4 に示す。主筋には上端・下端筋とも普通強度異形鉄筋 D19 を 4 本配置し，付着割裂破壊先行断面とした。また，横補強筋として外側主筋部分には D10 の普通強度異形鉄筋を配置した。

表 - 4 鉄筋の機械的性質

シリーズ	鉄筋種類	降伏点 (N/mm ²)	最大強度 (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)
1	D19 (主筋)	436	626	1.83 × 10 ⁵
	D10 (横補強筋)	383	565	1.83 × 10 ⁵
2	D19 (主筋)	384	570	1.85 × 10 ⁵
	D10 (横補強筋)	383	565	1.83 × 10 ⁵

(3) 連続繊維シート

連続繊維シートの力学特性を表 - 5 に示す。また，貼付要領を図 - 2 に示す。試験区間コーナー部の面取は r = 10mm とし，継手位置は割裂面に影響を与えないよう試験体中央部とし，重ね幅は 120mm とした。基本的には試験区間をストライプ状に試験筋に直交する方向に巻き付けた。また図に示す貼付方法は，p_{wf} = 0.08% に対応しており，それ以上の補強量の場合は補強比に比例させ重ねて巻き付けた。

表 - 5 連続繊維シートの力学的性質

	炭素
繊維目付 (gr/m ²)	300
繊維比重	1.80
設計厚さ (mm)	0.167
引張強度 (N/mm ²)	3400
引張弾性率 (N/mm ²)	2.30 × 10 ⁵
破断伸度 (%)	1.5

2.3 実験変数

実験変数はシート補強量 (p_{wf}) のみとした。また，シート補強比は横補強筋比と同様の算出方法であり，シート断面積を拘束するべきコンクリートの面積で除した値で定義する。

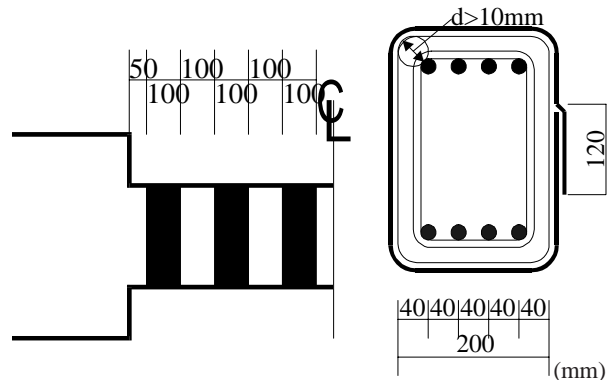


図 - 2 連続繊維シート貼付要領

2.4 載荷方法

載荷は逆対称載荷を採用し，正負繰返し載荷

を原則としているが、比較のために一方向の単調載荷を加えた試験体もあり、詳しくは表 - 6 に示す。履歴は部材の曲げ耐力の2/3を基準に載荷・除荷を行い、それぞれを2回繰り返した後、曲げ耐力までの載荷を行った。その後、著しい耐力低下がみられないものに関しては変位制御に切り替えた上で実験を継続した。

2.5 実験結果

(1) 実験結果の概要

表 - 6 に実験結果の概要を示す。なお、表中の付着割裂強度の計算値は文献1)において提案した以下に示す算定式を用いた。

$$\tau_{bu} = \tau_{co} + \tau_{st} + \tau_{wf} \quad (1)$$

$$\tau_{co} = (0.117 \cdot bi + 0.163) \cdot \sqrt{\sigma_b} \quad (2)$$

$$\tau_{st} = \left(9.51 \frac{p_{st} \cdot b}{N \cdot d_b} \right) \cdot \sqrt{\sigma_b} \quad (3)$$

$$\tau_{wf} = \frac{1}{6} \cdot \left(\frac{E_{wf}}{E_0} + 0.5 \right) \cdot \left[1 - \left(\frac{p_{wf}}{0.0035} - 1 \right)^2 \right] \cdot \sqrt{\sigma_b} \quad (4)$$

ここで、 τ_{co} ：コンクリートが負担する付着割裂強度(N/mm²)、 τ_{st} ：横補強筋が負担する付着割裂強度(N/mm²)、 τ_{wf} ：連続繊維シートが負担する付着割裂強度(N/mm²)、 bi ：割裂パターンを考慮した係数²⁾、 σ_b ：コンクリート強度(N/mm²)、 p_{st} ：横補強筋比、 b ：部材幅(mm)、 N ：主筋本数、

d_b ：主筋径(mm)、 E_{wf} ：連続繊維シートの弾性係数(N/mm²)、 E_0 ：2.30 × 10⁵(N/mm²)、 p_{wf} ：連続繊維シート補強比、但し、本算定式の適用範囲はシート補強比0.35%までとし、すべて下端筋の場合の算定法である。(2)、(3)式は藤井・森田式²⁾を本実験に対応するように変形させ、1.22を乗じ下端筋の算定法に対応させた。)

連続繊維シート無補強の試験体はいずれも付着割裂破壊を呈していることに対し、シート補強したものは主筋の曲げ降伏が確認されてはいるが、最大せん断力は付着の損失により決定された。シート補強比の増大に伴い、最大せん断力、主筋の付着強度も増大してはいるが、シートによる増分のみを比較すると、文献3)の実験結果と同様に、シート補強比と直線的な比例関係にあるとはいえない。

(2) せん断力 - 部材変形角関係

図 - 3 にせん断力 - 部材変形角関係(復元力特性)を示す。B9の曲線が付着割裂破壊後も明確な耐力低下を示していないのは、主筋の定着がスタブ内において充分すぎるほど良好であり、急激に抜け出さないためと考えられる。図中に示す一点鎖線は部材の曲げ耐力を示している。本実験はせん断余裕度と同様に算出できる付着せん断耐力/曲げ耐力で示される値(付着余裕

表 - 6 実験結果の概要

シリーズ	試験体名	載荷形態	コンクリート強度(N/mm ²)	最大せん断力 Q _{u.exp} (kN)	付着応力度 (N/mm ²)					主筋降伏
					実験値		計算値			
					u.exp	シートによる増分	f _m *1	w _f *2	b _u *3	
1	B9	正負繰返し	30.4	138	1.16	-	3.06	0	3.06	無
	B10	正負繰返し		186	2.13	0.96	3.06	0.56	3.62	有
	B11	正負繰返し		198	2.34	1.17	3.06	0.97	4.03	有
	B12	正負繰返し		143	1.18	-	3.06	0	3.06	無
2	B13	一方向単調	36.8	152	-	-	3.06	0	3.06	無
	B14	一方向単調	29.1	189	-	-	2.72	0.55	3.27	有
	B15	正負繰返し		151	-	-	2.72	0	2.72	無
	B16	正負繰返し	36.8	168	-	-	3.06	0.61	3.67	有
	B17	正負繰返し	29.1	181	-	-	2.72	0.95	3.67	有

*1：文献2)による付着割裂強度の計算値(N/mm²)、*2：文献1)による連続繊維シート補強による付着割裂強度増分(N/mm²)、*3： $b_u = f_m + w_f$

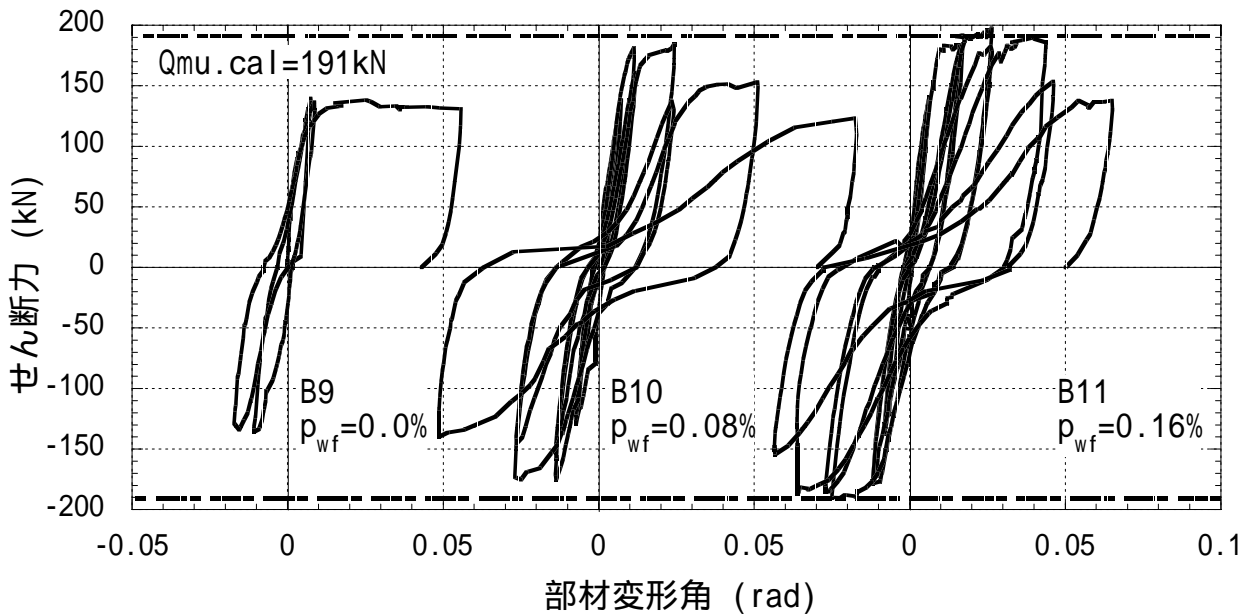


図 - 3 せん断力 - 部材変形角関係

度)が、どの程度であれば繰返し載荷時の耐力低下による脆性破壊を防止できるかを明らかにすることも目的の一つである。そのために付着余裕度が小さいと思われる断面での実験を行った。これを明らかにするためには付着せん断耐力を算定することが重要となる。この手法については後述する。

シート補強により、最大せん断力および部材の変形性能も向上している。しかし、補強比を増大させた効果は、せん断耐力のわずかばかりの向上と、最大耐力以降の耐力低下の低減であり、耐力および変形性能の両面とも効果が明確であるとは言い難い。

(3) 付着割裂強度

図 - 4 に連続繊維シートによる付着割裂強度増分と補強比の関係を示す。コンクリート強度の差異が影響を与えないよう縦軸はコンクリート強度の平方根で除し、無次元化してある。図中の実験値は、主筋に貼付したひずみゲージから試験区間の平均付着応力度を求め、シート補強した試験体の最大耐力時の付着応力度から、シート無の試験体のそれを差し引くことにより求めた。

これをみると、実験値は確実に計算値を上回っていることが判り、提案式が安全側の算定となっていることが判る。

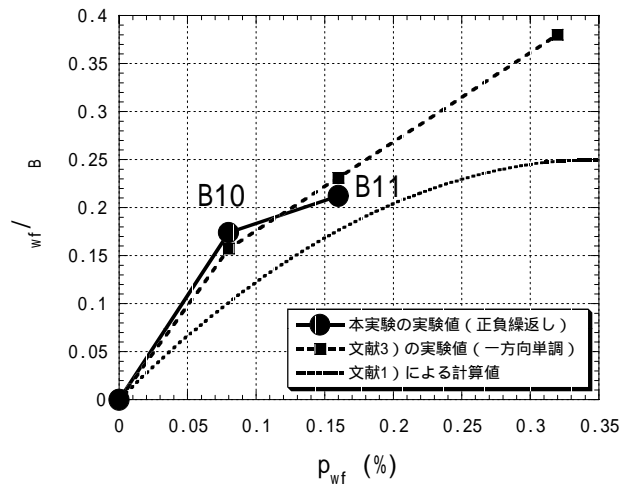


図 - 4 付着強度増大率

また、図中の示す一方向単調載荷である文献3)の実験結果と正負繰返し載荷を加えた本実験の結果を比較すると、補強比が小さい場合は繰返しによる付着劣化は確認できないが、補強比が大きくなれば顕著となる。今回の実験では $p_{wf}=0.16\%$ までであるが、補強比を増大させることが直線的な強度上昇につながらないことから判断すると、繰返しによる付着劣化は補強比の増大により拡大するものと考えられる。

3. 付着せん断耐力

付着割裂強度 b_u がわかっているものとして、その時の部材のせん断力を求めるにあたっては、トラス・アーチ作用に基づく方法が一般的である⁴⁾。すなわちこれを付着せん断耐力 Q_{bu} とする。

3.1 付着せん断耐力算定法

周知のようにトラス作用による負担せん断力は次のように表される。

$$Q_t = b \cdot jt \cdot p_w \cdot \sigma_{wy} \cdot \cot \phi \quad (5)$$

但し, b : 部材幅(mm), jt : 主筋間距離(mm), p_w : 横補強筋比, σ_{wy} : 横補強筋の降伏応力度(N/mm²) .

ここで, 主筋近傍の力の釣合から, 付着割裂破壊する時の $\cot \phi$ が次のように定義できる。

$$\cot \phi = \frac{\tau_u \cdot \sum \phi}{p_w \cdot \sigma_{wy} \cdot b} \quad (6)$$

但し, τ_u : 付着割裂強度(N/mm²), ϕ : 周長(mm) .

(6)式を(5)式に代入することで, トラス作用によるせん断耐力式となる。

$$Q_t = \tau_u \cdot \sum \phi \cdot jt \quad (7)$$

これにアーチ作用による付着せん断耐力を文献4)に示されているように累加することでRC部材の付着せん断耐力が以下のように算定できる。

$$Q_{bu} = Q_t + Q_a \quad (8)$$

$$Q_a = \tan \theta \cdot (1 - \beta_b) \cdot v_0 \cdot \sigma_B \cdot b \cdot D / 2 \quad (9)$$

$$\tan \theta = \sqrt{\left(\frac{L}{D}\right)^2 + 1} - \frac{L}{D} \quad (10)$$

$$\beta_b = \frac{2}{\sin 2\phi} \cdot \frac{\tau_{bu} \cdot \sum \phi}{b \cdot v_0 \cdot \sigma_B} \quad (11)$$

但し, v_0 : コンクリート有効強度係数(=0.7- β_b /200), σ_B : コンクリート強度(N/mm²), b : 部材幅(mm), D : 部材せい(mm) .

なお, アーチ作用による付着せん断耐力算定式中の β_b の算出は, 文献4)に示されている方法, $\theta = 45^\circ$ ($\cot \theta = 1.0$)と考えることが一般的である。しかし, 本報では(6)式の $\cot \phi$ の値からコンクリート圧縮束の角度 θ を算出し, (10)式に代入し, β_b を算出する方法を用いることとする。これにより, より正確な付着せん断耐力の算定が行えると考えられる。なお, $\cot \phi$ の値が1.0以下の値は1.0に, 2.0以上の値は2.0とした範囲内に限定し使用した。

(8)式のようにせん断設計に基づきアーチ作用による付着せん断耐力を算定する場合は, トラス作用による耐力がせん断限界に達したときのアーチ作用のせん断耐力を計算することになる。つまり, トラス作用では付着割裂破壊時のせん断耐力を算定していることに対し, アーチ作用ではせん断破壊時のせん断耐力を算定するという不合理が生じていると考えられる。そこで, 低減率 α を定義し, その不合理を解消する。これによりトラス作用と同様に付着せん断耐力の算定に対応できると判断できる。

$$\alpha = \frac{\text{付着耐力時のトラス作用負担せん断耐力}}{\text{せん断耐力時のトラス作用負担せん断耐力}} = \frac{\tau_u \cdot \sum \phi \cdot jt}{\sum (p_w \cdot \sigma_{wy}) \cdot b \cdot jt \cdot \cot \phi} \quad (12)$$

この α をアーチ負担分に乗じ, 付着せん断耐力を以下のように定義する。

$$Q_{bu} = Q_t + \alpha \cdot Q_a \quad (13)$$

3.2 2段配筋の場合の付着せん断耐力

冒頭でも述べたが, 昨今のRC部材は主筋が2段に配されることが少なくないため, 2段配筋の場合にも適応できる算定式が必要となる。先ほどのトラス作用による付着せん断耐力の算定式をみると, 付着強度が深く関連しているため, 2段配筋の場合の付着せん断力の算定には, 外側と内側の両者の主筋の付着応力度の相対的比率を決める必要があると考えられる。まずその比率について述べる。

試験区間に曲げひびわれが生じ, 付着が効かない部材せいDの長さを持つ領域ができるものとし, 外側主筋と内側主筋の引張力が0になる点が一致すると仮定すれば, 2段配筋のそれぞれの主筋の引張力は次のようになる。

$$T_{out} = \tau_{buout} \cdot \phi_{out} \cdot L_b \quad T_{in} = \tau_{buin} \cdot \phi_{in} \cdot L_b \quad (14)$$

但し, L_b : 引張領域長さ(mm)。また, 添え字は外側, 内側を表す。

また, 引張力をひずみを用いて表し, 整理すると, 外側主筋と内側主筋の付着応力度は(15)式

のようになる．これを付着せん断耐力の算定に用いる．

$$\frac{\tau_{buin}}{\tau_{buout}} = \frac{d_{in} - x_n}{d_{out} - x_n} \quad (15)$$

但し， x_n : 中立軸位置 (mm) ．

2 段配筋の場合のトラス作用は，外側主筋で囲まれた領域と内側主筋で囲まれた領域の両者による 2 重のトラス作用が存在すると考えるのが妥当と思われる．そこで，2 段配筋の場合のトラス作用が，外側主筋のトラス作用，内側主筋のトラス作用の重ね合わせで成立すると仮定し，付着せん断力は次式で表されるものとする．

$$Q_{bu} = Q_t + \alpha \cdot Q_a = Q_{tout} + Q_{tin} + \alpha \cdot Q_a \quad (16)$$

3.3 算定法の評価

図 - 5 に付着せん断耐力の実験値と計算値の比較を示す．図中の黒塗りのデータはシート補強された試験体を，白抜きのものはシート無補強のものを示している．また，比較のために文献 5), 6) の実験結果も表示した．(16) 式は横補強筋の有無に係わらずトラス作用による付着せん断耐力を算定する式となっているが，トラス作用は横補強筋によって構成される作用であるため，横補強筋がない場合にトラス作用による付着せん断耐力を算定することは矛盾がある．そこで，横補強筋のない試験体は $Q_t = 0$ としてせん断耐力を算定した．ただし，横補強筋はなくとも，シート補強されているものはシートがトラスを形成するものとしてトラス分を計算してある．

この図をみると，トラス作用の評価にもよるが，実験値と計算値がほぼ一致している．この結果から判断できるように，著者等が提案した付着割裂強度の算定式から，理論的に算出した付着せん断耐力の実験値との適合性はまずまずといえる．しかし，繰返し载荷を受ける試験体は，全体的に実験値が計算値を下回る危険側の算定となっているため，この算定法を実設計に適用させるには何らかの安全率が必要であると考えられる．

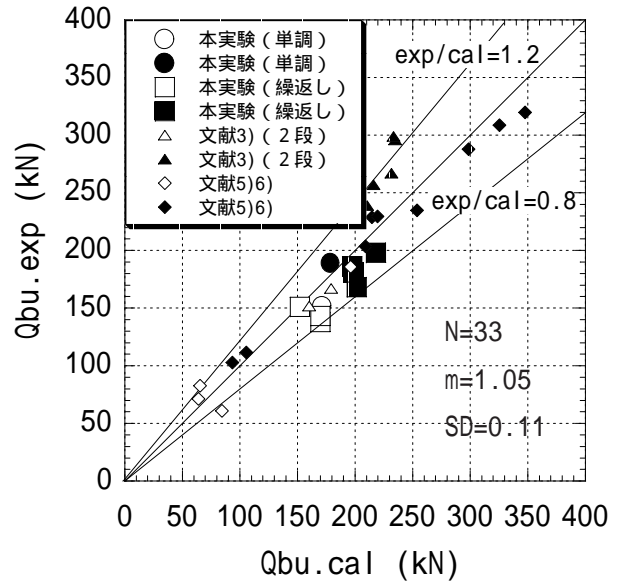


図 - 5 付着せん断耐力算定法評価

4. まとめ

本研究により得られた知見を以下に記す．

繰返し载荷を受けることで付着性能が劣化することが確認されたが，その場合 ($p_{wf} = 0.16\%$ 以内)においても，著者等の提案式は安全側の評価となることが確認された．

また，周知のトラス・アーチ作用を応用し誘導した付着せん断力の算定法が，安全率を検討することで実設計に十分適応できるものであることが確認された．

謝辞：本研究の実施にあたっては，SR-CF工法研究会より連続繊維シート材料をご提供いただいた．ここに記し深甚の謝意を表する．

参考文献

- 1) 松野一成・河野進・角徹三：連続繊維シートによる RC 部材の付着割裂強度増大効果 - 第 1 報 付着強度式の提案 - , 日本建築学会構造系論文集, 第 548 号, pp. 95-100, 2001
- 2) 藤井栄・森田司郎：異形鉄筋の付着割裂強度に関する研究, 日本建築学会論文報告集, 第 319 号, pp. 47-55, 1982
- 3) 松野一成・角徹三・山崎敬子・桶谷秀人：逆対称载荷を受ける連続繊維シートで補強された RC 部材の付着割裂強度, コンクリート工学年次論文報告集, 第 23 号第 3 巻, pp. 997-1002, 2001
- 4) 日本建築学会・構造委員会：連続繊維補強材のコンクリート構造への応用, 1998 年度日本建築学会大会 (九州) 構造部門 (連続繊維) パネルディスカッション資料, pp. 83-91, 1998
- 5) 萩尾浩也, 勝俣英雄, 小畠克朗：炭素繊維ストランドによる既存コンクリート柱の耐震補強 (その 3 付着割裂破壊の実験的検討), 日本建築学会学術講演梗概集 (関東) C - 2 構造, pp. 669-670, 1997.9
- 6) 勝俣英雄, 小畠克朗, 武田寿一：炭素繊維による既存コンクリート柱の耐震補強に関する研究 (その 2) - 矩形断面柱の補強に関する実験 - , 大林組技術研究所報 34, pp. 114-118, 1987