

論文 ポリエステル製繊維シートによりせん断補強されたR C 柱の構造性能

田村 玲^{*1}・田才 晃^{*2}・壁谷澤 寿海^{*3}・五十嵐 俊一^{*4}

要旨：ポリエステル製の繊維シートによりせん断補強したRC柱について，その補強効果を把握することを目的とし，実験的検討を行った。既存RC部に巻き付けるシートの量をパラメータとした実験を行い，純RC柱と比較した。実験の結果，シート補強量を増やすことにより柱部材のせん断耐力・靱性能が向上すること，また，そのせん断耐力は帯筋の降伏歪とシートの引張強度時歪の比によってシートの引張強度を低減することで，純RC部材と同様に評価できることが確認できた。

キーワード：ポリエステル製繊維シート，SRF補強，せん断耐力，靱性能

1. はじめに

脆性的な破壊モードを有する鉄筋コンクリート造建物では，地震時の水平力による柱の破壊とほぼ同時に柱が鉛直荷重支持能力を失い，建物全体または一部が倒壊に至る。このような倒壊現象を防止するための新たな補強方法として，柱にポリエステル製繊維シート（以下シート）を巻きつける方法（以下SRF）が提案され，柱の軸力支持能力が飛躍的に改善されることが実験的に実証されている。¹⁾²⁾

そこで本報では，脆性的な破壊モードのRC造柱に対してSRF補強を施した場合の，水平力に対する性能改善効果を定量的に把握することを目的として，せん断破壊を対象とした構造実験の結果を報告し，シートの補強効果を考慮した耐力評価法を示す。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

試験体は無補強試験体1体，補強試験体3体の計4体である。試験体形状を図-1に，試験体一覧を表-1に示す。

主な諸元として，断面形状，内法高さ（mm）， p_t ， p_w ，コンクリート強度は全試験体共通とした。シートの補強量をパラメータとし，試験体はせん断破壊型とした。

2.2 材料特性

表-2，表-3，表-4に使用材料特性を示す。シートの引張試験には供試体を3本用い，特性値は3本の平均値とした。また，シートの引張試験結果を図-2に示す。

表-1 試験体一覧

試験体No	B×D (mm)	H (mm)	F_c (MPa)	Main bars	p_t (%)	Hoops	p_w (%)	Axial loading	Strengthening*
1	300×300	600	24	12-D13 SD390	0.71	D6@50 SD295	0.43	0.25bDFc	
2									1層
3									2層
4									3層

B×D：幅×せい，H：内法スパン， p_t ：引張鉄筋比， p_w ：せん断補強筋比

*1 横浜国立大学大学院 工学府 社会空間システム学専攻 建築学コース (正会員)

*2 横浜国立大学 工学研究院 システムの創作部門 助教授 博(工) (正会員)

*3 東京大学地震研究所 教授 工博 (正会員)

*4 構造品質保証研究所(株) 工博 (正会員)

2.3 補強方法

試験体全面にエポキシウレタン系の接着剤を塗布した後、幅44.5mm、厚さ4mmのシートを重ねないように、1周巻く間にシートの幅分だけずらして人力で引っ張りながら螺旋状に巻きつけた。また、2層目、3層目についても同様である。補強方法を図-3に示す。

2.4 加力方法

加力は図-4に示す加力装置により行い、一定軸力下（軸力比0.25）での正負交番繰り返し载荷とした。部材各Rを400分の1, 2, 3, 4, 6, 8, 16, 24, 32, 48, 64, 96と制御し、試験体が軸力を保持できなくなるまで、または水平変位が水平ジャッキの限界に達するまで加力し、その後水平変位をゼロ付近まで戻し、軸圧縮を行った。また、シートの歪の計測には上危険断面から150mm, 300mm, 450mmの位置にそれぞれ5箇所づつ歪ゲージを貼り付けて計測した。

3. 実験結果

実験結果一覧を表-5に、またNo.1, No.2試験体の+8/400rad. の状況を写真-1に示す。

3.1 破壊性状

無補強試験体であるNo.1試験体は±1/400rad. で曲げひび割れが発生し、±2/400rad. でせん断ひび割れが発生した。±3/400rad. のピークにおいて最大水平耐力に達したが、その後、せん断ひび割れの進展に伴い±6/400rad. で水平耐力が最大水平耐力の80%以下に低下した。-16/400rad. に向かう途中でせん断ひび割れが広がり、軸力および水平力を負担できなくなり最終破壊に至った。

補強量1層であるNo.2試験体は補強の関係でひび割れについては確認できなかったが、±4/400rad. のピークにおいて最大水平耐力に達し、±8/400rad. で水平耐力が最大水平耐力の80%以下に低下した。

補強量2層であるNo.3試験体は±6/400rad. のピークにおいて最大水平耐力に達し、±16/

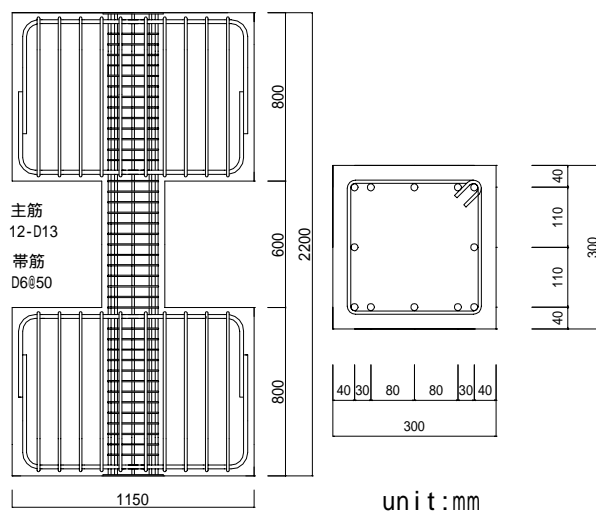


図-1 試験体形状

表-2 コンクリート材料試験結果

呼び強度 (kN)	ヤング係数 ($\times 10^4$ MPa)	最大荷重 (kN)	β (MPa)	圧縮強度時歪 (%)
24	1.35	217	27.52	0.28

表-3 鉄筋材料試験結果

鉄筋種	ヤング係数 ($\times 10^5$ MPa)	降伏強度 (Mpa)	降伏歪 (%)	引張強度 (MPa)	破断歪 (%)
D13 (SD390)	1.80	433	0.31	612	13.67
D6 (SD295)	2.06	405	0.28	535	16.68

表-4 シート材料試験結果

厚さ mm	幅 mm	引張強度 MPa	引張強度時の歪度 %	弾性係数 MPa
4.0	45	283	6.19	4581

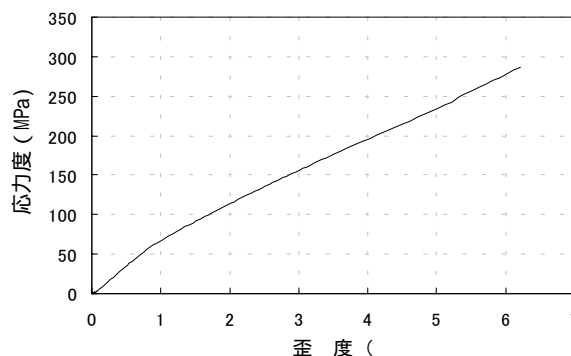


図-2 シート引張試験結果

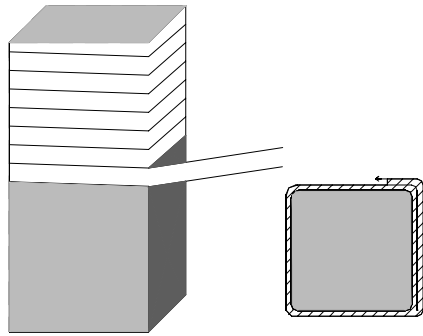


図-3 補強方法

400rad. で水平耐力が最大水平耐力の80%以下に低下した。

補強量3層であるNo.4試験体は±6/400rad.のピークにおいて最大水平耐力に達し、+24/400rad.、-16/400rad.で水平耐力が最大水平耐力の80%以下に低下した。

3.2 最大耐力

各試験体の水平力 - 水平変形関係の包絡線を図-5に示す。図中の数値はP-効果を考慮したものである。

初期剛性は補強による影響はないものの、最大耐力は補強層数が増えると直線的に向上する傾向があり(図-6)、No.2～No.4試験体はNo.1試験体に比べると最大耐力の上昇の割合は正負各方向の平均で9.79%、15.19%、18.59%となっている。つまり、シートのせん断補強効果は既存RC部と同様に、せん断補強筋とシートを合わせたせん断補強量 ($p_w \cdot w$) により、評価できるものと思われる。

最大耐力以降の変形性能

は、補強により改善され、終局変形(最大耐力に対する耐力が80%時の変形)は補強量が増すほど大きくなっている。各補強試験体ともシートの破断は見られず、本補強法が大変形時にも安定して補強効果を示すことがわかる。また、主筋に関しては、No.1試験体は全く降伏していません、

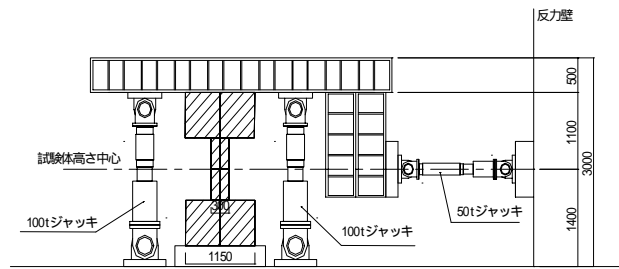


図-4 加力装置図

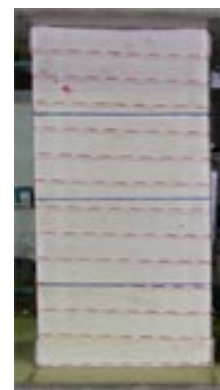
表-5 実験結果一覧

試験体	正負	Q_{max} (kN)	R_{max} (%) R_{max} (mm)	R_u (%)
No.1	正	329.0	0.74 4.46	1.0
	負	-345.0	-0.75 -4.51	-1.0
No.2	正	370.0	0.99 5.96	1.5
	負	-370.0	-1.00 -5.99	-1.5
No.3	正	391.5	1.50 9.01	2.0
	負	-385.4	-1.51 -9.08	-2.0
No.4	正	396.2	1.53 9.16	4.0
	負	-403.1	-1.51 -9.08	-2.0

Q_{max} : 最大水平耐力, R_{max} : 最大水平耐力時の部材角, R_{u} : 終局部材角(最大水平耐力の80%以下になった時の部材角)



No.1 試験体



No.2 試験体

写真-1 水平載荷終了時の状況

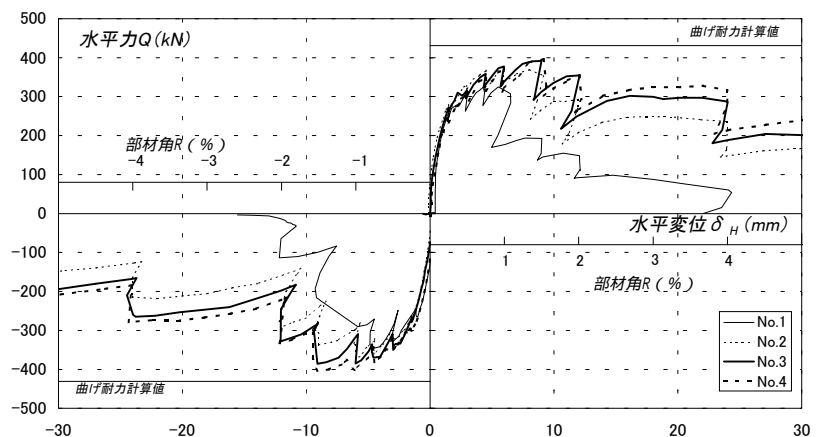


図-5 水平力 - 水平変形関係包絡線

補強試験体である No.2 ~ No.4 試験体は何本かの主筋が降伏しているものの部材降伏には至らなかった。(引張主筋が半分以上降伏した時点で部材降伏とした。)

3.3 軸力 - 軸方向変形関係

No.1, No.2 試験体の軸力 - 軸方向変形関係を図-7に示す。無補強試験体である No.1 試験体は軸変形 5mm 程度で定軸力を保持できなくなるのに対して、補強試験体である No.2 試験体は軸変形約 160mm (水平変形 128/400rad.)まで安定して定軸力を保持することが可能であった。また、その他の補強試験体についても同様に、水平ジャッキの限界まで定軸力を保持できた。

3.4 部材角 - 軸方向変形関係

各試験体の部材角と軸方向変形の間を関係を図-8に示す。図中の軸方向変形の値には各部材角における一回目のピークの値を用いた。No.1 試験体はせん断ひび割れが発生し、進行するにしたがって (6/400rad. 付近) 軸方向変形が進み、水平耐力、軸耐力ともに急激に低下するのに対し、補強試験体である No.2 ~ No.4 試験体は 16/400rad. 程度の変形までは軸方向変形はほとんど進まなかった。また、補強量が多くなるにつれて、SRF による周方向の拘束力により、軸方向変形を抑制するという補強効果が顕著に表れていることがわかる。

3.5 柱の残存軸耐力

補強試験体については水平載荷終了後に軸圧縮載荷を行った。各補強試験体の軸圧縮試験結果を図-9に示す。3.4で述べた通り補強量が多くなるほど水平載荷終了時点の軸変形は小さくなるが、軸圧縮試験においてはどの試験体も同様の挙動を示した。軸力ジャッキの容量 1960kN いっぱいまで加力しても最大軸耐力まで到達せず軸破壊は起こらなかった。また、シートの破断も見られなかった。この実験によって確認された最大軸力比は 0.8 程度であった。

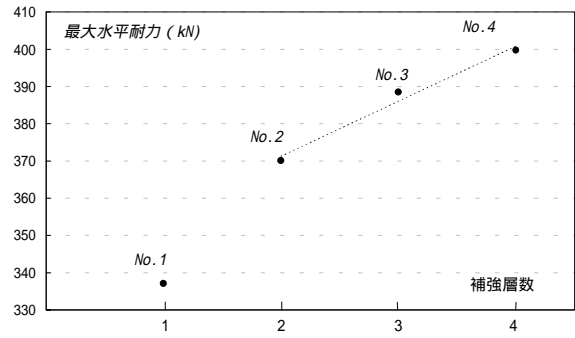


図-6 補強層数と最大水平耐力の関係

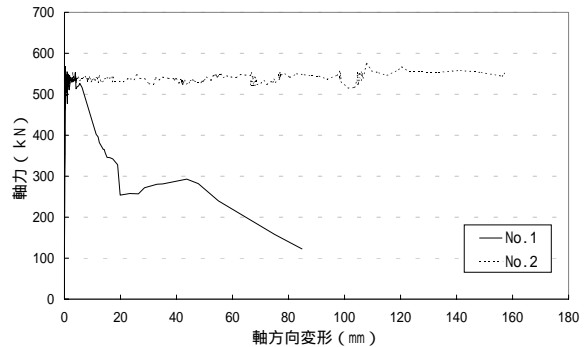


図-7 軸力 - 軸方向変形関係

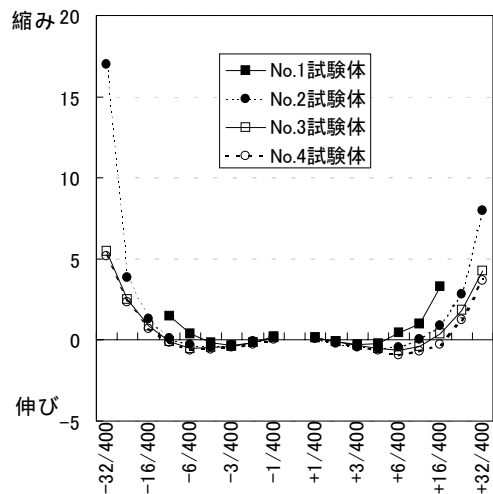


図-8 部材角 - 軸方向変形関係

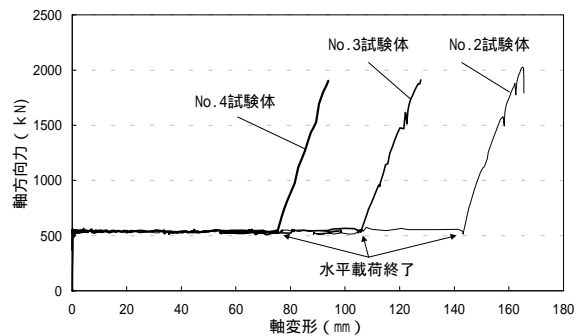


図-9 軸圧縮試験結果 (No.2 試験体)

4. せん断耐力評価に関する検討

4.1 シートの歪分布

シートの歪は、図-10に示す位置に貼り付けた歪ゲージによって計測した。これらのゲージの貼り付け位置は試験体高さの中心である。各試験体の最大水平耐力時のシート歪を図-11に示す。各試験体のゲージの位置によって多少ばらつきはあるものの、平均値をとるとNo.2試験体は0.26%、No.3試験体は0.31%、No.4試験体は0.22%となっていて、補強量による影響はほとんど無いと言える。せん断補強筋の降伏歪は2.3に示した通り0.28%で、ほぼ最大水平耐力時のシートの歪と同等な値となる。これはシートがせん断補強筋と同程度、周方向歪を拘束しているからである。したがって、最大耐力時にシートが負担する応力はせん断補強筋の降伏時歪におけるシートの応力と考えることができる。

4.2 せん断補強量 ($p_w \cdot w_y$)

せん断耐力を算定するにあたり、せん断補強量 ($p_w \cdot w_y$) を評価する必要がある。これまでに炭素繊維等の研究において、せん断補強量の評価にはいくつかの方法が提案されてるが、本研究ではシートの引張強度時歪と帯筋の降伏強度時歪の比によって評価する。(1)式のように

($p_w \cdot w_y$) を求めることを提案する。(1)式により計算した各試験体の ($p_w \cdot w_y$) を表-6に示す。

$$\sum (p_w \cdot w_y) = p_{ws} \cdot w_{ys} + \frac{p_{wf}}{f} \cdot p_{wf} \cdot w_f \quad (1)$$

- p_{ws} : 帯筋のせん断補強筋比
- p_{wf} : シートのせん断補強筋比
- w_{ys} : 帯筋の降伏強度
- w_f : シートの引張強度
- p_{wf} : 帯筋の降伏強度時歪
- f : シートの引張強度時歪

$$p_{wf} = \frac{2t_f}{b + 2t_f}$$

t_f : シートの厚さ

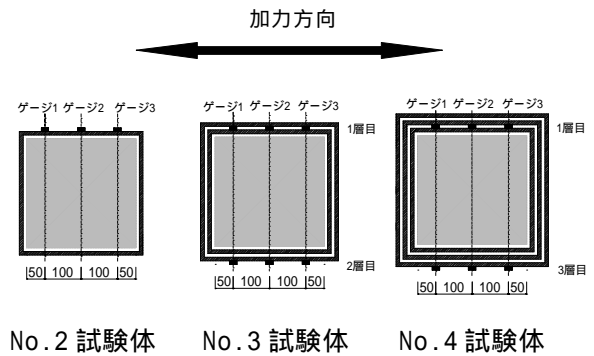


図-10 シート歪測定位置

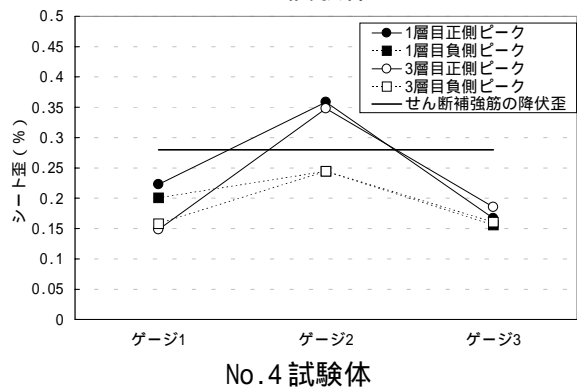
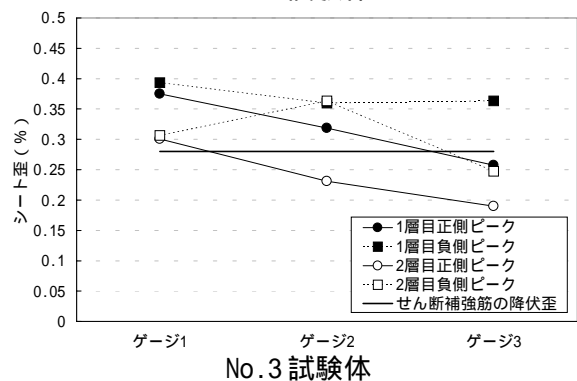
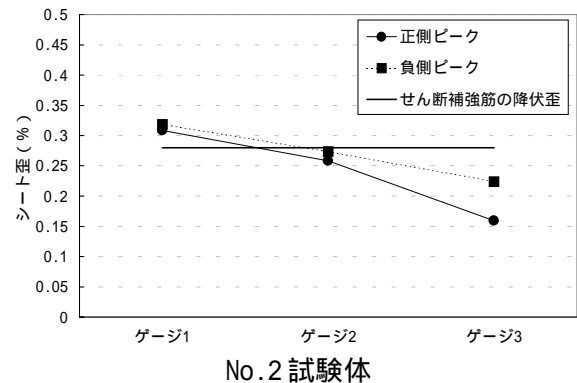


図-11 最大耐力時のシート歪

表-6 ($p_w \cdot w_y$) 計算値

	シート層数	p_{ws}	σ_{wys}	p_{wf}	σ_{wvf}	$p_{ws} \cdot \sigma_{wys}$	$\sum (p_{ws} \cdot \sigma_{wys})$
No. 1		0.0043	405	0	283	1.73	
No. 2	1	0.0043	405	0.0250	283	1.73	2.08
No. 3	2	0.0043	405	0.0488	283	1.73	2.42
No. 4	3	0.0043	405	0.0715	283	1.73	2.74

4.3 計算値と実験値の比較

せん断耐力 Q_{su} の評価式として(2)式の終局強度型耐震設計指針式(以下,指針式)³⁾, (3)式の荒川 mean 式⁴⁾を用いて,実験値との適合性を検討する。

$$Q_{su} = b \cdot j_t \cdot (p_w \cdot w_y) \cot \theta + \tan \phi \cdot (1 - \mu) \cdot b \cdot D \cdot \sigma_c \cdot B / 2 \quad (2)$$

$$Q_{su} = \left\{ \frac{0.068 \times p_t^{0.23} \cdot (18 + F_c)}{M / (Q \cdot d) + 0.12} + 0.85 \sqrt{(p_w \cdot w_y)} + 0.1 \sigma_c \right\} \cdot b \cdot j \quad (3)$$

指針式による計算値と実験値の比較を図-12に,荒川 mean 式による計算値と実験値の比較を図-13に示す。なお,図中には本実験の結果とともに,文献2)におけるせん断破壊した試験体の結果も同時に示している。指針式による計算値は実験値によく対応している,概ね安全側に評価している。一方,荒川 mean 式による計算値は,安全側には評価しているものの,計算値と実験値が適合しているとは言い難い。これは,荒川式はせん断補強の効果を過少評価している等の理由が考えられる。

7. まとめ

RC 柱の SRF 補強によるせん断補強効果を確認する実験から以下のことがわかった。

- 1) SRF 補強により,せん断耐力を上昇させることができる。
- 2) シートの補強量が増すほど,せん断耐力は上昇し,(1)式によりせん断補強量を求めることにより,(2)式により従来の RC 部材と同様にせん断耐力を評価できる。
- 3) 過大軸変形に対しても軸耐荷能力が失われず,部材角 128/400rad.における軸耐力は 0.8Fc 相当以上残存していた。

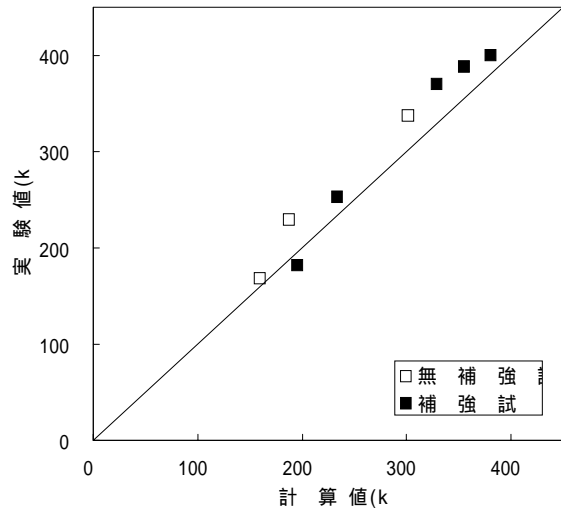


図-12 実験値と計算値の比較(指針式)

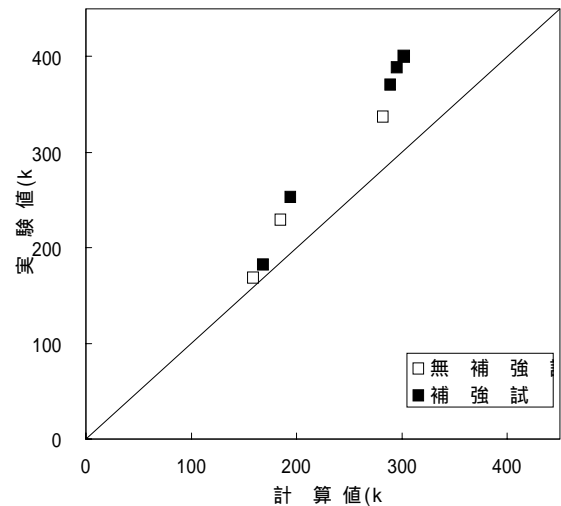


図-13 実験値と計算値の比較(荒川 mean 式)

【参考文献】

- 1) 小泉 洋・壁谷澤 寿海ほか: コンクリート柱の地震時軸圧縮破壊に対するシート補強に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.23, No.1, pp937-942, 2001
- 2) 田村 玲・田才 晃ほか: RC 柱の地震時軸圧縮破壊に対するポリエステル製シートによる補強, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.24, No.2, pp1285-1290, 2002
- 3) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説
- 4) 日本建築防災協会: 既存鉄筋コンクリート造建物の耐震診断基準・同解説, 1990.12