

[2097] SFRC 中の異形鉄筋の付着，定着性状に関する実験研究

正会員 ○寺岡 勝 (フジタ工業技術研究所)

正会員 横須賀誠一 (フジタ工業技術研究所)

1. はじめに

鋼繊維補強コンクリート (略号: SFRC) の優れた力学特性に着目した構造部材への適用研究が、近年多く行なわれてきている[1]。その結果、SFRCと鉄筋との併用による鋼繊維補強鉄筋コンクリート部材は、鉄筋コンクリート部材に比べ、優れた力学性能 (特に、せん断強度及び変形性能) を有することが明らかになってきている[1]。しかしながら、鋼繊維補強鉄筋コンクリート部材の基本的な力学特性の一つである鉄筋とSFRCとの付着及び定着性状に関する研究は、僅かにSwamyらの引張付着性状の研究[2]、亀田らの90°折曲げ定着性状の研究[3]があげられるだけで、定量的な評価をするためには不十分な状態である。

本研究は、上記のことを踏まえ、SFRC中の異形鉄筋の付着及び定着性状を明らかにすることを目的とし、引抜及びはり型の付着実験、90°折曲げ定着実験、十字型柱・はり接合部内のはり主筋の付着及び定着実験を行ない、主として鋼繊維混入率が付着及び定着性状に与える影響を検討したものである。なお、本研究の一部は、文献[4]、[5]で発表したものである。

2. 付着実験

付着性状を検討するために2種類の実験を行なった。一つは、JCI提案の引抜試験法によるもので、他の一つは、ACI 208委員会提案のはり型付着試験法に準じたものである[6]。

2.1 引抜付着実験

2.1.1 試験体と実験方法

試験体は、図-1に示すようにJCI提案に基づいた形状とし、鉄筋種類及び鋼繊維混入率 (略号: V_f) を実験因子とした6種類で、各種類それぞれ3体ずつの合計18体である。試験体リストを表-1に示す。コンクリート調合等を表-2に示す。コンクリートは、供試鉄筋に対し鉛直方向に打設した。加力及び測定方法を図-2に示す。加力は、アムスラー型試験機により荷重速度3 t/min以下で行ない、測定は、荷重の他に、自由端すべりを変位計にて検出し記録すると共に、ひびわれ状態を記録した。

2.1.2 実験結果と考察

(1) 実験結果

実験結果の一覧を表-3に、付着応力度 (τ) と自由端すべり変位 (Δs) との関係を図-3に、また自由端特定すべり時

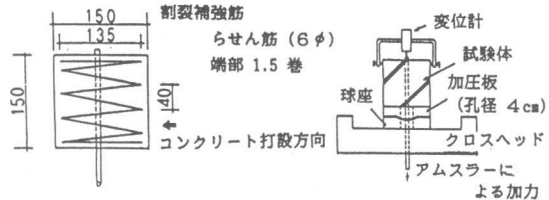


図-1 試験体形状 図-2 加力及び測定方法

表-1 引抜付着試験体リスト

鉄筋	鋼繊維混入率 V_f (%)			備考
	0	1	2	
D19 斜め筋 $\sigma_y = 4.04(t/cm^2)$	PF0-19	PF1-19	PF2-19	試験材令 10日 $V_f=2\%$ 試験体振動締固め
D25 横筋 $\sigma_y = 3.49(t/cm^2)$	PF0-25	PF1-25	PF2-25	試験材令 7日 $V_f=2\%$ 試験体振動締固め

表-2 引抜付着試験体用コンクリート調合と強度

粗骨材最大径 (mm)	W/C (%)	S/a (%)	単位水量 (kg/m³)	単位セメント量 (kg/m³)	V_f (%)	σ_B (kg/cm²)	σ_{St} (kg/cm²)	適用試験体
15	55	50	180	327	0	317	29.3	供試鉄筋
					1	340	—	D19
					2	377	—	試験体
					0	308	29.9	供試鉄筋
					1	328	—	D25
					2	340	—	試験体

いる荷重は、鉄筋に貼付した表裏2枚のひずみゲージで測定したひずみ度より算出した。

2.2.2 実験結果と考察

(1) 実験結果

実験結果の一覧を表-7に示す。試験体左右のうち、最終的に鉄筋の抜け出した側の付着応力度(τ)と荷重端抜け出し変位(Δs)との関係包絡線を図-6に、また付着割裂ひびわれ発生時付着応力度及び最大付着強度について V_f 及びコンクリート強度との関係を図-7に示す。各試験体の破壊形式は、付着割裂ひびわれの成長による付着割裂破壊であった(図-8参照)。

(2) 付着強度

鋼繊維混入により、付着割裂開始及び0.25mm抜け出し時の各付着応力度は増大しないが、最大付着強度(τ_u)は増大する。供試鉄筋径の小さい試験体の増大率は、供試鉄筋径の大きい試験体に比べ、大きくなっている。 τ_u は、コンクリートシリンダーの割裂強度にほぼ比例して大きくなっている。シリンダーの割裂強度は、 V_f の増大に伴い大きくなっており、その結果、 V_f の増大により τ_u が増加するものと考えられる。

表-8に、既往の付着割裂強度推算式を用いた計算値に対する実験値の比を比較して示す。各推算式は、普通コンクリートを対象にした式であるが、ここではSFRC試験体についても同様に算定した。同表中には、図-8に示した破壊状態を図-9に示すごとくモデル化し、下記(1)式による計算値に対する実験値の比を併せて示す。本実験試験体に対し、①コンクリートの破壊線を図-9のように定め、その破壊線の強度はシリンダーの割裂強度に等しい、②横補強筋の付着割裂強度への効果はOrangunらの提案[7]に等しい、と仮定することにより(1)式が得られる。

$$c \tau_u = (b - d_b + c) \sigma_{et} / \phi + 0.8 \sqrt{\sigma_B} \quad (1)$$

ここで、 b : はり幅、 d_b : 供試鉄筋径、 c : 底面かぶり厚さ、 σ_{et} : シリンダー割裂強度、 ϕ : 供試鉄筋周長、 σ_B : シリンダー圧縮強度。

表-8によると、既往の提案式による計算値

に対し実験値は高くなっているが、上記(1)式による計算値は、SFRC試験体の実験値を含めほぼ一致している。このことより、付着割裂強度算定には、コンクリート寄与分の評価にシリンダーの割裂強度を用いるのがよいと考えられる。なお、本試験体に対し、コンクリートの寄与は、

表-7 はり型付着実験結果概要一覧

試験体	付着割裂開始付着応力度			0.25mm抜け出し時付着応力度			最大付着強度		
	τ_s	$\frac{\tau_s}{\sigma_B}$	R	$\tau_{0.25}$	$\frac{\tau_{0.25}}{\sigma_B}$	R	τ_u	$\frac{\tau_u}{\sigma_B}$	R
BB-0-22	63.6	0.21	1.00	73.0	0.24	1.00	98.7	0.32	1.00
BB-F150-22	88.5	0.27	1.39	73.5	0.23	1.01	132.7	0.41	1.34
BB-0-25	69.7	0.25	1.00	69.5	0.25	1.00	98.9	0.35	1.00
BB-F75-25	76.1	0.28	1.09	78.0	0.30	1.12	107.4	0.41	1.09
BB-F150-25	69.0	0.21	1.00	69.0	0.21	0.99	112.4	0.34	1.13

注) $\tau_s, \tau_{0.25}$: 試験体左右両側測定の平均値
 τ_u : 最終的に供試鉄筋が抜け出した側の値
 R: $V_f=0\%$ 試験体に対する付着応力度比
 単位: τ (kg/cm²)

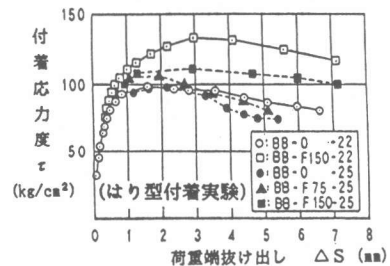


図-6 付着応力度-荷重端抜け出し関係包絡線

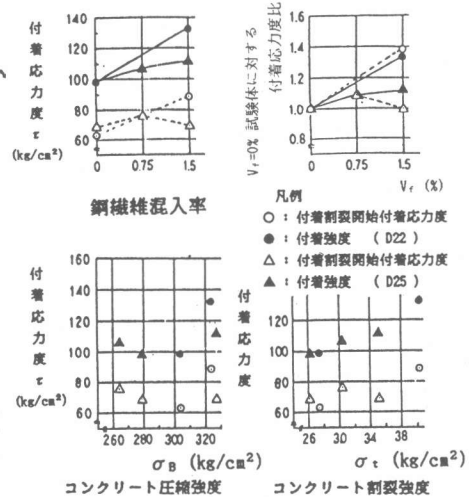


図-7 付着応力度と V_f 及びコンクリート強度との関係

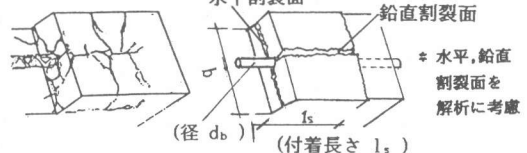


図-8 実験終了時破壊例 図-9 解析モデル

既往の提案式が $3.11\sqrt{\sigma_B} \sim 3.55\sqrt{\sigma_B}$ (50~64 kg/cm²)でほぼ一致しているのに対し、(1)式が70~125kg/cm²と高く、横補強筋の寄与分は、柴田らの式[8]で、36.4kg/cm²であるのに対し、その他が9~19kg/cm²となっている。

(3) 付着応力度一荷重端抜け出し変位関係

図-6より、SFRC試験体は、 $V_f = 0\%$ 試験体に比べ τ_u 以降の強度劣化が少なく、また

τ_u 時の抜け出し変位は、 V_f の増加により増加し、その結果、エネルギー吸収量も増大している。

3. 折曲げ定着実験

3.1 試験体と実験方法

試験体は、定着深さ、供試鉄筋径及び V_f を実験因子とした8体である。本実験は、特に90°折曲げ部以降の定着性状を検討するために、のみ込み部は付着力が作用しないように縁を切った。試験体の形状を図-10に、またその諸元を表-9に示す。供試鉄筋の折曲げ半径(内径)は、 $r = 2.6d_b$ とし、コンクリートは、平打ちした。

加力及び測定方法を図-11に示す。加力はセンターホール型の油圧ジャッキを用いて供試鉄筋に引張力を与えた。加力段階は供試鉄筋の応力度(ロードセルで検出した荷重より換算)で制御し、繰り返しは表-10に示すように行なった。抜け出し変位(Δs)は、測定変位からののみ込み部の伸び変位を差引いて求めた。

3.2 実験結果と考察

(1) 実験結果

実験結果の一覧を表-11に、定着鉄筋応力度(σ_s)と抜け出し変位(Δs)との関係包絡線を図-12に示す。破壊タイプは、定着の浅いSHシリーズでは、断面が破断し上方に持上がる(タイプI)のに対し、定着が深いDHシリーズでは、定着付近の断面が割裂され、コンクリートがはらみ出す(タイプII)、の2つのタイプがあった。

(2) 定着強度

図-13に、定着強度(σ_h)と V_f との関係を示す。 σ_h は、 V_f にほぼ比例して増大し、また定着深さ(AL)が深いものが大きい。ALの増加による σ_h の増加は、鋼繊維混入により、より大きくなる。ALを鉄筋径(d_b)で除した値がほぼ同じ場合、 d_b の大き

表-8 最大付着強度の計算値に対する実験値の比

試験体	C1		C2		C3		C4	
	C1	C2	C1	C2	C3	C4	C3	C4
BB-0-22	68.9	1.43	90.5	1.09	80.4	1.23	98.4	1.01
BB-F150-22	71.1	1.87	93.0	1.43	83.0	1.60	139.1	0.95
BB-0-25	65.6	1.51	87.7	1.13	70.2	1.41	82.9	1.19
BB-F75-25	64.7	1.66	87.4	1.23	68.3	1.57	93.9	1.14
BB-F150-25	71.0	1.72	92.0	1.22	76.0	1.48	107.9	1.05

注) C1: ORANGUNらの提案式[7]による計算値
 C2: 柴田、荒井の提案式[8]による計算値
 C3: 藤井、森田の提案式[9]による計算値
 C4: 本文中(1)式による計算値
 単位: C1~C4 (kg/cm²)

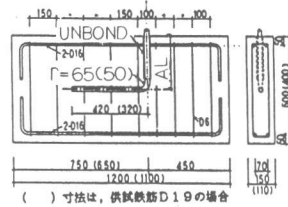


図-10 定着試験体形状

表-10

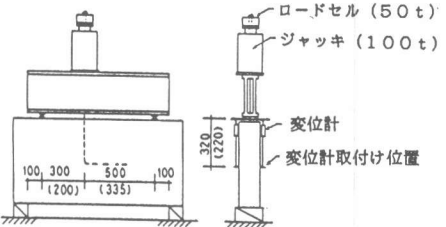
加力スケジュール

段階	鉄筋応力度 σ_s (t/cm ²)	繰返し 回数
P ₁	1.2 (1/3 σ_y)	1
P ₂	1.8 (1/2 σ_y)	1
P ₃	2.4 (2/3 σ_y)	1
P ₄	3.6 (σ_y)	3
P ₅	4.0	3
P ₆	4.5	3
P ₇	5.0	3

表-9 定着実験試験体諸元

試験体	供試鉄筋	定着深さAL	コンクリート割合と強度			
			割合	V_f 強度		
SH-0-25	D2.5 ネジ節	273	粗骨材	0	258	25.9
SH-F75-25			最大寸法	0.75	247	27.8
SH-F150-25			Ms=25mm	1.50	253	32.4
DH-0-25	$\sigma_y =$ 3.69	500	W/C=65%	0	253	28.6
DH-F75-25			S/a=42%	0.75	243	28.3
DH-F150-25			W=168	1.50	278	33.2
SH-0-19	D19 $\frac{1}{2}$ 筋	180	C=258	0	254	26.3
SH-F150-19			$\sigma_y = 3.7$	1.50	296	34.3

注) 鋼繊維: 表-2下参照, 単位: σ_s, σ_{st} (kg/cm²)



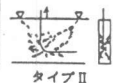
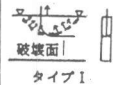
() 寸法は、供試鉄筋D19の場合

図-11 定着実験加力及び測定方法

表-11 定着実験結果概要一覧

試験体	定着強度 σ_h	同左強度比		破壊タイプ	計算値 $e\sigma_h$	σ_h $e\sigma_h$
		R/V	RAL			
SH-0-25	3.00	1.00	—	I	2.95	1.02
SH-F75-25	3.50	1.17	—	I	2.89	1.21
SH-F150-25	4.00	1.33	—	I	2.92	1.37
DH-0-25	3.47	1.00	1.16	II	2.92	1.19
DH-F75-25	4.48	1.29	1.28	II	2.86	1.57
DH-F150-25	>5.30	>1.53	>1.25	引抜けず	3.06	>1.73
SH-0-19	3.50	1.00	—	I	3.22	1.09
SH-F150-19	4.20	1.20	—	I	3.47	1.21

注) R/V: $V_f = 0\%$ 試験体に対する定着強度比
 RAL: 定着深さによる定着強度比
 $e\sigma_h$: MARQUESらの提案式[10]による計算値
 単位: $\sigma_h, e\sigma_h$ (t/cm²)



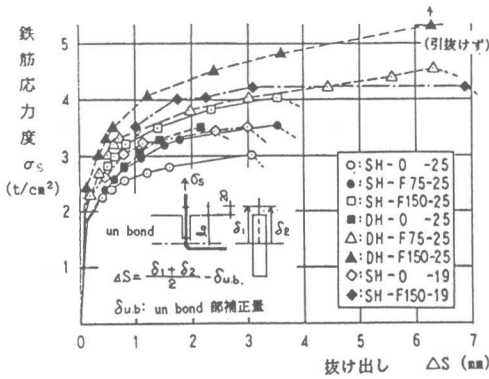


図-12 供試鉄筋応力度-抜け出し関係包絡線

いものが、 V_f の増加により、 σ_h はより大きくなる。表-11中に、定着強度について実験値とMarquesらの提案式[10]による計算値とを比較して示す。その際、同式は、SFR C試験体にも適用できるとして、同様に算定した。計算値は、普通コンクリート試験体に対しては実験値と良い一致を示すが、SFR C試験体については実験値に比べかなり低い。SFR C中の定着強度の評価には、Marquesらの式に、さらに V_f 及び定着深さについて考慮する必要があると考えられる。

(3) 定着鉄筋応力度-抜け出し変位関係

図-12より、抜け出し変位は約1mmを超えると急激に大きくなり、 σ_h までの抜け出し変位は、 V_f の増加に伴い大きくなっている。従って、 V_f の増加は、 σ_h の増加と相まって、定着鉄筋の抜け出しエネルギー吸収能を増大させる。図-14に、定着鉄筋応力度と折曲げ部抵抗比率(β)との関係を示す。 $V_f=1.5\%$ では β が10%以下になった時に抜け出すのに対し、 V_f が0%では β が30%で抜け出している。このことが、鋼繊維混入によりエネルギー吸収性能を増大させる主要因であると考えられる。

4. 十字型柱・はり接合部内はり主筋の付着及び定着性状の実験

4.1 試験体と実験方法

試験体は、接合部コンクリートの V_f を実験因子とした3体で、その諸元を表-12に、接合部詳細を図-15に、また全体形状を図-16に示す。はり主筋は、上端を通し配筋とし、下端を接合部内に折曲げ定着した。下端筋に対し、リングを用いて定着補強をした。コンクリートは、接合部を先に打設し、約一週間後、柱及びはりを打設した。いずれも平打ちとした。

加力及び変位測定方法を図-16に示す。加力は、柱に一定軸圧を加えつつ、両はり端に逆対称の荷重を表-13に示す加力スケジュールに従い行なった。変位は、接合部で支持したゲージホルダーとはり及び柱との相対変位及び接合部のせん断変形を測定した。また、はり主筋、補強リング、接合部横補強筋等についてひずみゲージを貼付し、ひずみ度を測定した。

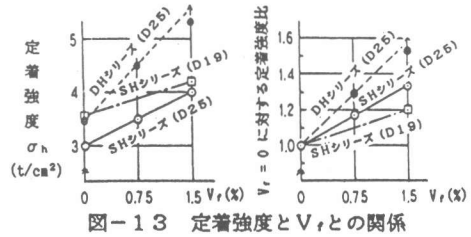


図-13 定着強度と V_f との関係

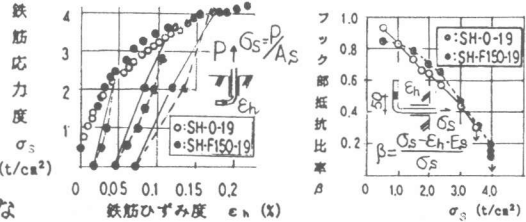


図-14 供試鉄筋応力度とフック部抵抗比率

表-12 十字型柱・はり接合部試験体諸元

試験体	接合部				はり		柱		
	帯筋	V_f (%)	σ_{st}	$\sigma_{st}/E_{1/4}$	断面 $b \times D$	主筋	断面 $b \times D$	主筋	
82 No.2	□-D6@43	0	305	22.1	205	17.5	上下共各	30	8-D19
82 No.3	$P_w=1.0\%$	1.0	265	24.5	178	×	3-D19 σ_y	×	$P_g=$
82 No.4	$\sigma_y=3.32$	1.5	302	31.3	191	35	$=4.14$	30	2.54%

注) 単位: σ_b 、 σ_{st} (kg/cm²)、 σ_y 、 $E_{1/4}$ (t/cm²)、 b 、 D (cm)
補強リング: $t \times w = 8 \times 30$ (mm \times mm) STKM 16A規格品

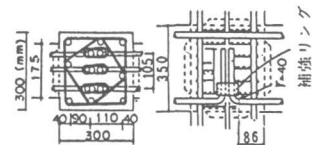


図-15 接合部詳細

表-13

加力スケジュール

加力段階	制御量	繰返回数
N	$N=54t$ (柱軸力導入)	
P1	$\delta_s=3.5$ mm ± 1	
P2	$\delta_s=6.5$ mm ± 2	
P3	$\delta_s=10$ mm ± 2	
P4	$\delta_s=20$ mm ± 2	
P5	$\delta_s=30$ mm ± 2	
P6	$\delta_s=40$ mm ± 2	
P7	$\delta_s=50$ mm ± 1	

δ_s : はり変位、接合部のせん断変形を含んだ値

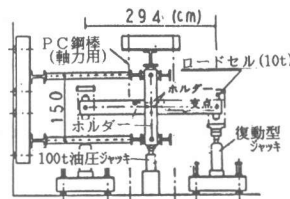


図-16 加力及び測定方法

4. 2 実験結果と考察

(1) 実験結果

表-14に、はりと接合部の最大荷重時及び破壊モードについて一覧にして示す。破壊モードは、いずれも降伏後の繰返し加力による接合部のせん断破壊であった。破壊程度は、 V_f の大きいものほど軽い状態であった。

(2) 考察

はり荷重 (Q_B) とはり変位 (δ_B) との関係包絡線及び等価粘性減衰定数について、図-17及び図-18にそれぞれ示す。これによると、 V_f の増加に伴いはりの変形性能及び等価粘性減衰定数は大きくなっている。これは、 V_f の増加に伴い、接合部のせん断強度が大きくなり[11]、はり耐力時の接合部の余裕が大きくなること、更にはり主筋に対しての接合部内の付着及び定着強度が大きくなること、によると考えられる。

上記のことを検討するために、はり主筋の接合部からの抜け出し変位、上端通し主筋の付着応力度及び下端定着主筋の定着補強リングに入る力等を V_f パラメータとして図-19～図-21にそれぞれ比較して示す。これによると、 V_f の増加により、はり主筋の抜け出しは少なくなり、付着強度は増す。また、下端定着部については、のみ込み部の付着強度は V_f により余り増加しないが、折曲げ部の定着強度は、 V_f の増加により大きくなり、リングに入る力が減る。

5. 結論

- 1) SFRC中の異形鉄筋の付着及び定着の強度と引抜き変形性能は、普通コンクリート中のそれに比べ、改善される。
- 2) 十字型柱・はり接合部パネルにSFRCを用いれば、接合部内はり主筋の付着及び定着性状が改善され、接合部せん断強度の増加と相まって、はりの力学性状が改善される。

〔謝辞〕本実験遂行に協力頂いたフジタ工業技術研究所清川博、吉野次彦両氏に深謝します。

引用並びに参考文献

- [1] 例えば、日本建築学会：スチールファイバーコンクリートの技術と現状、1984.3月
- [2] R.N.Swamy et al.: Bond strength of steel fibre reinforced concrete. Concrete, The Jour. of the concrete Society, Aug., pp.36-37, 1974
- [3] 亀田泰弘、秋塚繁幸、別所佐登志、岡本公夫、福島稔、坂野正：繊維補強コンクリートの高層RC部材への利用に関する一実験、日本コンクリート工学協会・繊維補強コンクリートに関するシンポジウム発表論文集、PP.109-112、昭和52年11月7日
- [4] 筆者ら：繊維補強鉄筋コンクリート材に関する実験的研究（第1報・繊維補強コンクリート中の鉄筋の付着、定着試験）、日本建築学会 関東支部研究報告集、PP.241-244、昭和58年7月
- [5] 同上：同上（第8報・プレキャスト十字型柱・はり接合部にSFRCを用いた加力実験）、日本建築学会大会学術講演梗概集、PP.1875-1876、昭和58年9月
- [6] 日本建築学会：鉄筋コンクリート終局強度設計に関する資料、シリーズ11、建築雑誌、Vol.94、No.1158、PP.59-61、昭和54年12月
- [7] C.O.ORANGUN, J.O.JIRSA and J.E.BREEN: A Reevaluation of Test Data on Development Length and Splices, ACI Jour., MAR., PP.114-122, 1977
- [8] 柴田拓二、荒井康幸：鉄筋コンクリート部材の脆性破壊時の耐力推算式の検討、北海道工学部研究報告、第92号、PP.15-27、昭和54年
- [9] 藤井肇、森田一郎：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、昭和58年2月
- [10] J.L.G.MARQUES and J.O.JILSA: A Study of Hooked Bar Anchorages in Beam-Column Joints, ACI Jour., MAY, PP.198-209, 1975
- [11] 筆者ら：文献[4]と同題（第7報・十字型柱・はり接合部の加力実験）、日本建築学会大会学術講演梗概集、PP.1605-1606、昭和57年10月

表-14 十字型柱・はり接合部実験結果概要一覧

試験体	はり最大荷重 Q_{BN}		接合部最大荷重			破壊モード		
	上端筋引張 実験 実/計	下端筋引張 実験 実/計	Q_{PN}	τ_{PN}	τ_{PN} σ_B			
82 No.2	7.63	1.01	7.64	1.01	59.1	113.0	0.37	はり降伏→
82 No.3	7.64	1.01	7.70	1.02	59.7	114.3	0.43	接合部
82 No.4	7.68	1.01	7.81	1.03	60.5	115.7	0.38	せん断破壊

注) 実験値：正負両荷重時平均、はり曲げ耐力： e 関数法
 $Q_{PN} = (2M_{BN}/J_B - Q_C)$ 、 $\tau_{PN} = Q_{PN}/t_p \cdot J_C$ 、 $t_p = (\text{柱幅} + \text{はり幅})/2$ 単位： Q_{BN} 、 Q_{PN} (ton)、 τ_{PN} (kg/cm²)

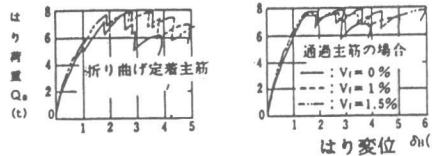


図-17 はり荷重-はり変位関係包絡線の比較

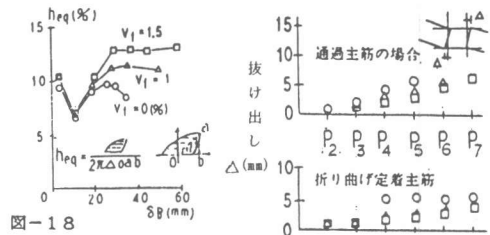


図-18

等価粘性減衰定数 図-19 主筋抜け出し変位

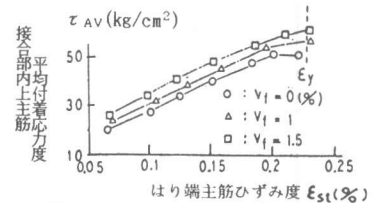


図-19 主筋抜け出し変位

図-20 通し主筋付着応力度

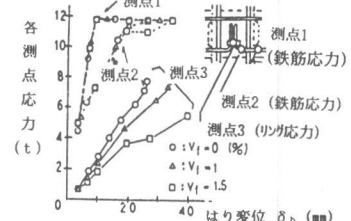


図-21 折曲げ定着部各測点応力