

論文 炭素繊維シートによる鉄筋コンクリートはりのせん断補強に関する実験的研究

加藤博文^{*1}・児島孝之^{*2}・高木宣章^{*3}・濱田 譲^{*4}

要旨：炭素繊維シートの補強量、弾性係数、積層数、補強方法を要因として鉄筋コンクリートはりを作製し、せん断耐力に対するシートの補強効果について検討した。また、一部の供試体では、スターラップが降伏する程度まで損傷を与えた後にシート補強を施し、健全な部材と比較を行った。せん断補強材として炭素繊維シートを用いることによりせん断耐力は向上する。しかし、その補強効果についてはシートの補強方法の影響を大きく受ける。また、損傷を受けた部材に炭素繊維シートを巻き付けて補強した場合、シートの補強効果は健全な部材に補強したときと同様の評価ができる。

キーワード：炭素繊維シート、せん断補強、せん断耐力、損傷コンクリート

1. はじめに

高強度繊維シートによる既存コンクリート部材の補強は、施工性に優れていることから注目されており、これに関する研究も増えつつある。炭素繊維シートによる曲げおよびせん断補強に関する基礎的実験については既に報告した[1]。本研究は、炭素繊維シートによるせん断に対する補強効果をより定量的に把握することを目的とし、鉄筋コンクリートはりの載荷試験を実施した。

2. 実験概要

2. 1 実験計画

供試体の名称および要因を表-1に示す。No.1～No.3供試体は比較用で、炭素繊維シートによる補強を施さないで、スターラップの間隔を変化させた。No.4～No.11供試体は、スターラップの有無、炭素繊維シートの目付量および弾性係数を組み合わせ、せん断補強量を変化させた。No.12およびNo.13供試体はシートの補強を2層とすることで、積層数を変化させた。No.14～No.17供試体におけるシートの補強方法は、実際の施工上の制約を考慮して、はり断面全面巻き付けではなく側面のみに接着させた。No.18およびNo.19供試体は、損傷を受けた既存コンクリート部材を想定して、はりに斜めひびわれを発生させた後にシート補強を施した。表-1のせん断補強比(p_w)およびせん断補強量($p_w \cdot \sigma_w$)は、式(1)および式(2)より算出した。

$$p_w = p_s + p_{ef} = 2 \cdot A_s / (b_w \cdot s) + 2 \cdot b_{ef} (\sin \alpha + \cos \alpha) / b_w \quad (1)$$

$$p_w \cdot \sigma_w = p_s \cdot \sigma_s + p_{ef} \cdot \sigma_{ef} \quad (2)$$

ここに、 A_s ：スターラップ1本当たりの断面積、 s ：スターラップ間隔、 b_w ：はりの断面幅

b_{ef} ：炭素繊維シートの設計厚さ、 α ：シートの配列方向と部材軸のなす角度

σ_s ：スターラップの降伏強度、 σ_{ef} ：炭素繊維シートの引張強度

*1 静岡県、工修（正会員）

*2 立命館大学教授 理工学部 土木工学科、工博（正会員）

*3 立命館大学助教授 理工学部 土木工学科、工博（正会員）

*4 ドービー建設工業（株） 技術センター、工修（正会員）

2.2 使用材料

実験に使用した炭素繊維

シートは、繊維糸を1方向に配列したもので、繊維糸の交錯による屈曲がない構造になっている。炭素繊維シートの力学的特性を表-2に示す。炭素繊維シートは引張強度および弾性係数の異なる高弾性タイプと高強度タイプの2種類を使用した。補強量を変化させるためシートの目付量は、高弾性タイプ、高強度タイプともに100g/m²および200g/m²

表-1 供試体の名称および要因

No.	要因	供試体名	スターラップ°	炭素繊維シート			p _w * (%)	p _w ・σ _w ** (kgf/cm ²)
				タイプ	目付量(g/m ²)	補強方法		
1	比較用	N	—	—	—	—	0.000	0.00
2		N10	D6@10cm	—	—	—	0.422	14.78
3		N5	D6@ 5cm	—	—	—	0.845	29.56
4	シートの補強量および弾性係数	N-E100Z	—	高弾性	100x1層	ゼブラ	0.034	8.63
5		N-E100	—	高弾性	100x1層	全面	0.072	18.43
6		N10-E100	D6@10cm	高弾性	100x1層	全面	0.494	33.21
7		N-E200	—	高弾性	200x1層	全面	0.144	36.86
8		N10-E200	D6@10cm	高弾性	200x1層	全面	0.566	51.64
9		N-H100	—	高強度	100x1層	全面	0.074	27.83
10		N10-H100	D6@10cm	高強度	100x1層	全面	0.496	42.61
11		N-H200	—	高強度	200x1層	全面	0.148	55.67
12		N-E100Zx2	—	高弾性	100x2層	ゼブラ	0.067	17.25
13	積層数	N-E100x2	—	高弾性	100x2層	全面	0.144	36.86
14		N-E100S	—	高弾性	100x1層	側面	0.072	18.43
15	補強方法	N-E100SS	—	高弾性	100x1層	側面斜め	0.102	26.06
16		N10-E100S	D6@10cm	高弾性	100x1層	側面	0.494	33.21
17		N10-E100SS	D6@10cm	高弾性	100x1層	側面斜め	0.524	40.84
18		C10-E100	D6@10cm	高弾性	100x1層	全面	0.494	33.21
19	はりの損傷***	C10-H100	D6@10cm	高強度	100x1層	全面	0.496	42.61

*) せん断補強比で式(1)により算出

**) せん断補強量で式(2)により算出

のものを使用した。また、***) スターラップが降伏する程度まで損傷を与えた後シート補強

炭素繊維シートの接着にはエポキシ樹脂系接着剤を使用した。コンクリートの示方配合を表-3に示す。

コンクリートの圧縮強度はシートの接着時において供試体状況 スターラップ° 間隔 シートのタイプ° シートの目付量 Z: ゼブラ
N: 健全 10: 10cm E: 高弾性 100: 100g/m² S: 側面
C: 損傷 5: 5cm H: 高強度 200: 200g/m² SS: 側面斜め
260kgf/cm²、載荷試験時において310kgf/cm²であった。使用した鋼材の力学的特性を表-4に示す。

N10-E100S

接着方法
Z: ゼブラ
S: 側面
SS: 側面斜め

2.3 供試体および試験方法

供試体は寸法が15x24x200cmの鉄筋コンクリートはりで、有効高さは20cmとした。炭素繊維シートをゼブラ状および全面に巻き付ける供試体には、応力集中によるシートの強度低下を緩和するため、コーナー部に半径1cmの面取りを設けた[2]。全ての供試体がせん断破壊するように、引張鋼材として異形PC鋼棒(ケビンデスターフ, φ23)を2本、圧縮鉄筋として異形鉄筋(SD345, D10)を2本配置した。異形PC鋼棒は緊張せず、定着板により供試体端部に定着させた。

供試体は1週間散水養生を行い、シートの接着は材令28日から実施した。シートの接着方法は供試体表面に樹脂を塗布した後にシートを貼り付け、その上から樹脂を含浸させた。シートを2層貼り付ける場合は、1層ごとに樹脂を含浸させた。代表的な供試体の補強状況および載荷条件を図-1に示す。載荷条件は、支点間距離160cm、曲げスパン80cmの2点集中単調曲げ載荷とした。したがって、せん断スパン有効高さ比(a/d)は2.0である。また、載荷試験にともない、スターラップおよび炭素繊維シートのひずみを測定した(図-1参照)。

表-2 炭素繊維シートの特性

タイプ	目付量(g/m ²)	比重	設計厚さ(mm)	引張強度(kgf/cm ²)	弾性係数(kgf/cm ²)
高弾性	100	1.84	0.0543	25600	4.42x10 ⁶
	200	1.84	0.1086	(43000)	(4.45x10 ⁶)
高強度	100	1.80	0.0556	37500	2.50x10 ⁶
	200	1.80	0.1111	(50000)	(2.35x10 ⁶)

()内の数値は炭素繊維単体の特性

表-3 コンクリートの示方配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				混和剤(cc/m ³)	
		W	C	S	G	AE減水剤	AE助剤
60	46	174	290	824	1008	2900	1450

*) AE減水剤は25%溶液として使用

AE助剤は1%溶液として使用

表-4 鋼材の力学的特性

使用箇所	材質および径	降伏強度(kgf/cm ²)	引張強度(kgf/cm ²)	弾性係数(kgf/cm ²)
スターラップ°	SD295, D 6	3500	5500	2.1x10 ⁶
圧縮鉄筋	SD345, D10	4000	5900	2.1x10 ⁶
引張鋼材	ケビンデスターフ, φ23	10800	12000	2.0x10 ⁶

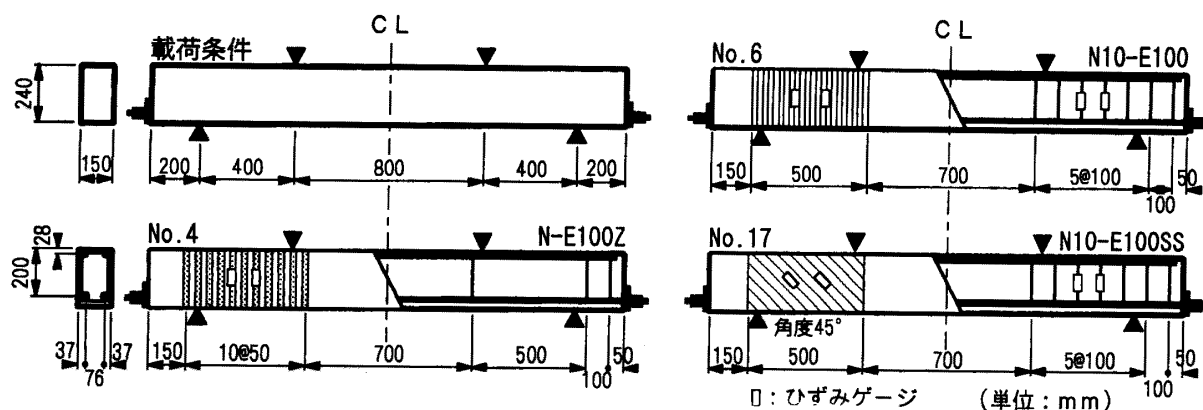


図-1 供試体の補強状況および荷重条件

3. 実験結果および考察

表-5 に曲げ破壊荷重およびせん断破壊荷重の理論値と、実験により得られた供試体のスターラップの降伏荷重、最大荷重および破壊形式を示す。スターラップの降伏荷重は、荷重とスターラップひずみの関係から推定した。せん断耐力の算定には式(3)を用いた。荷重試験の結果、曲げ圧縮破壊したNo.11供試体を除くほとんどの供試体がせん断破壊により終局に至った。

$$V = V_o + V_w \quad (3)$$

ここに、 V ：せん断耐力

V_o ：コンクリートのせん断耐力で

$$0.94 \cdot \beta_a \cdot \beta_p \cdot (f'_c)^{1/3} \cdot$$

$$\{0.75 + 1.4/(a/d)\} \cdot b_w \cdot d$$

V_w ：補強材のせん断耐力で $(p_w \cdot \sigma_w) \cdot b_w \cdot z$ ， $(p_w \cdot \sigma_w)$ は式(2)による

表-5 実験結果および計算耐力

No.	供試体名	理論値(tf)		実験結果(tf)		実験値 理論値	
		P_{mu}	P_{vu}	P_{sy}	P_u 破壊形式		
1	N	41.70	11.50	—	12.98	せん断圧縮	1.13
2	N10		19.21	23.50	25.25	せん断圧縮	1.31
3	N5		26.92	32.25	32.95	せん断圧縮	1.22
4	N-E100Z		16.00	—	20.50	せん断圧縮*	1.28
5	N-E100		21.11	—	31.90	せん断圧縮*	1.51
6	N10-E100		28.82	32.70	33.76	せん断圧縮*	1.17
7	N-E200		30.73	—	33.01	せん断引張*	1.07
8	N10-E200		38.44	36.50	41.10	せん断圧縮*	1.07
9	N-H100		26.02	—	29.75	せん断圧縮*	1.14
10	N10-H100		33.73	29.90	33.81	せん断圧縮*	1.00
11	N-H200		40.54	—	35.75	曲げ圧縮	0.87
12	N-E100Zx2		20.50	—	26.40	せん断圧縮*	1.29
13	N-E100x2		30.73	—	36.66	せん断圧縮*	1.19
14	N-E100S		21.11	—	20.50	シート剥離	0.97
15	N-E100SS		25.09	—	21.40	シート剥離	0.85
16	N10-E100S		28.82	27.50	27.75	シート剥離	0.96
17	N10-E100SS		32.80	28.70	29.10	シート剥離	0.89
18	C10-E100		28.82	31.26	34.50	せん断圧縮*	1.20
19	C10-H100		33.73	30.90	35.65	せん断圧縮*	1.06

P_{mu} ：曲げ破壊荷重， P_{vu} ：せん断破壊荷重

P_{sy} ：スターラップの降伏荷重， P_u ：最大荷重

*：炭素繊維シートの破断により破壊した供試体

3. 1 シートの補強量および弾性係数の影響

炭素繊維シートで補強したNo.5およびNo.9供試体の最大荷重は、31.90tfおよび29.75tfであり、無補強のNo.1供試体の12.98tfに比べて大幅に増加する結果となった。シートとスターラップの両方で補強したNo.6およびNo.10供試体の最大荷重（33.76tfおよび33.81tf）も、スターラップのみで補強したNo.2供試体（25.25tf）よりも増加していることから、スターラップの有無に関わらず、シートはせん断補強材として有効に作用するものと考えられる。また、炭素繊維シート1層で補強したNo.4とNo.5供試体の最大荷重が20.50tf、31.90tfであるのに対し、2層で補強したNo.12とNo.13供試体の最大荷重が26.40tf、36.66tfであることから、積層数を増やすことにより、せん断耐力を増加できるものと考えられる。

せん断破壊荷重とせん断補強比の関係を図-2に示す。せん断破壊荷重とせん断補強比の関係は、図-2に示したように大きく分けて、シートのみで補強された供試体、シートとスターラップの両

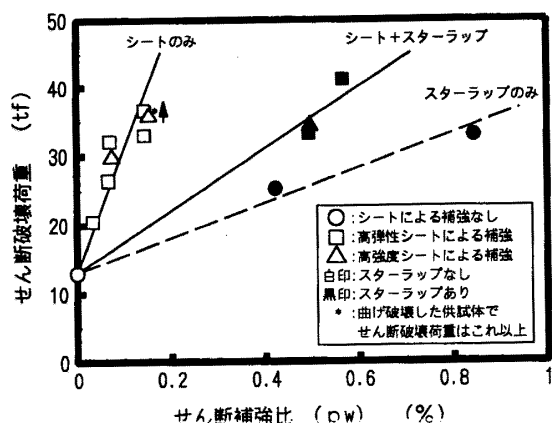


図-2 セン断破壊荷重とせん断補強比の関係

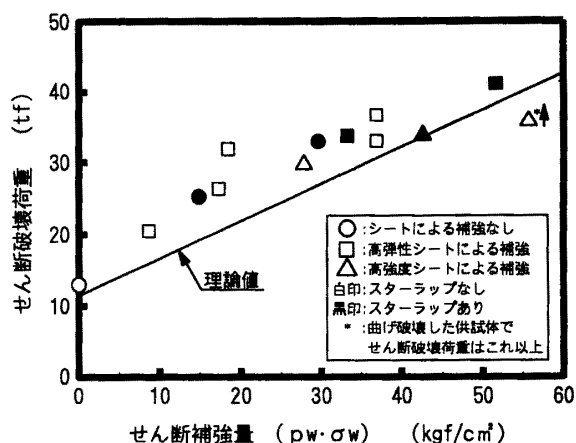


図-3 セン断破壊荷重とせん断補強量の関係

者により補強された供試体、スターラップのみで補強された供試体の3つの直線で示すことができる。図中の実線と破線の差が炭素繊維シートによる耐力の上昇分である。せん断耐力の増加割合は、シートのみで補強された供試体の方がシートとスターラップを併用した供試体より大きくなっている。これは、シートが有する引張強度が高いという特徴がせん断耐力の向上に大きく寄与しているためであり、シートはスターラップに比べて低補強比で高い補強効果が得られることを示している。

せん断破壊荷重とせん断補強量の関係を図-3に示す。せん断破壊した供試体は、せん断補強量の増加にともなってせん断耐力は増加している。その増加の割合は、スターラップのみで補強した供試体、シートとスターラップの両方で補強した供試体、シートのみで補強した供試体ともに、ほぼ一定とみなすことができる。したがって、シートによるせん断耐力の向上効果は、スターラップと同様に評価することができるものと考えられる。図-2と合わせて考察すると、シートによる補強効果はせん断補強比ばかりでなく、その引張強度の影響を大きく受けている。一般に高強度せん断補強筋の補強効果は、せん断補強量よりもせん断補強比に依存するとされているものの[3]、高強度を有する炭素繊維シートのせん断補強効果はせん断補強量に依存しており、耐力の算定はせん断補強量で検討するのが妥当であると考えられる。図-3に示した理論値は式(3)を用いて算定しており、シートの補強効果はせん断補強量をパラメーターとしている。せん断破壊した供試体の実験値は全て理論値を上回っており、安全側の値を示している。

図-4にNo.2、No.5、No.6、No.9およびNo.10供試体の荷重とスターラップおよび炭素繊維シートひずみの関係を示す。炭素繊維シートとスターラップの両方で補強したNo.6とNo.10供試体のスターラップひずみは、同一荷重において、スターラップのみで補強したNo.2供試体よりも小さくなっていることから、シート補強によってせん断力に対するスターラップの負担が軽減しているのが分かる。その軽減の割合は、高弾性タイプのシートで補強したNo.6の供試体の方が、高強度タイプのシートで補強したNo.10の供試体よりも大きくなっていることから、シートの弾性係数はスターラップの負担力軽減に影響を及ぼすものと考えら

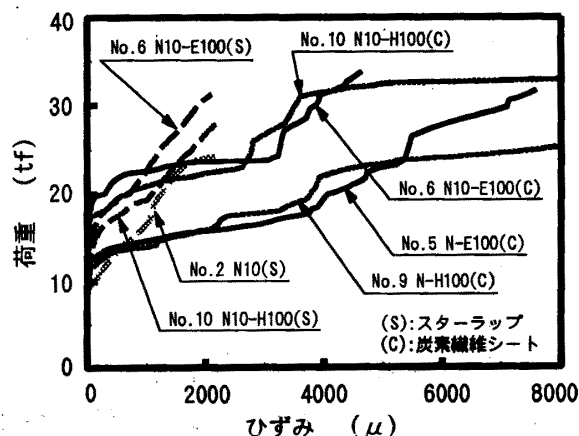


図-4 荷重とひずみの関係

れる。No.6とNo.10供試体のシートひずみに着目すると、シートのみで補強したNo.5とNo.9供試体よりも、ひずみの急激な増加が高い荷重で生じていることから、シートとスターラップの両方で補強することにより、コンクリートの斜めひびわれ発生荷重は増加するものと考えられる。

3.2 シートの補強方法の影響

側面に炭素繊維シートを接着したNo.14およびNo.16供試体の最大荷重は、各々20.50tfおよび27.75tであった。この値は、シート補強のないNo.1供試体の12.98tfおよびNo.2供試体の25.25tfに比べると最大荷重が増加しており、側面補強による効果が認められた。しかし、同じ補強を巻き付けで施したNo.5供試体の31.90tfおよびNo.6供試体の33.76tfと比較すると、No.14供試体の最大荷重はNo.5供試体の64%、No.16供試体の最大荷重はNo.6供試体の87%であった。したがって、炭素繊維シートを側面に接着することによってせん断耐力は向上するものの、側面補強は巻き付け補強した場合と同等の補強効果は期待できないものと考えられる。

No.14およびNo.15供試体の破壊状況図を図-5に示す。No.14～No.17供試体はシートの配列方向に関わりなく、シートとコンクリートの界面の接着が切れ、シートが剥離した後せん断圧縮破壊により終局に至った。炭素繊維シートの剥離は、図-5に示すように、斜めひびわれの上側の三角形部分に発生しており、下側は破壊後もシートとコンクリートが一体化していた。

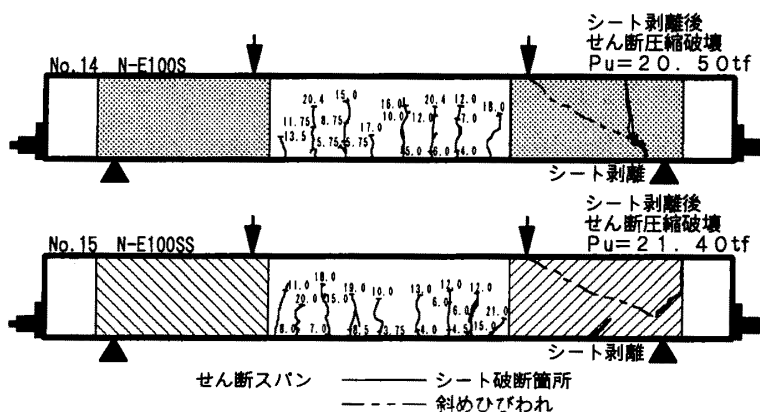


図-5 破壊状況図

繊維を鉛直に配列したNo.14供試体では、シートの剥離が支点内側のせん断スパンに留まっているのに対して、斜め45°に配列したNo.15供試体では、シートの剥離が支点を越えた広い範囲に及んでおり、シートの剥離状況の相違が観察された。したがって、シートの剥離により破壊に至る場合、その剥離状況はシートの配列方向の影響を受けるものと考えられる。

図-6にNo.14～No.17供試体の荷重とスターラップおよび炭素繊維シートひずみの関係を示す。最大荷重時における炭素繊維シートひずみは全て約4000 μ 程度であり、高弾性シートの破断ひずみが5800 μ であることを考慮すると、シートの効果が十分に発揮されないまま破壊に至ったものと推測される。これは、破壊形式が接着切れによるシートの剥離に支配されたためであり、側面接着補強では、シートとコンクリートの接着強度がせん断耐力および破壊性状に大きな影響を及ぼすものと考えられる。鉛直に繊維を配列したNo.16供試体と斜め45°に配列したNo.17供試体のスターラップひずみは、ほぼ同一の挙動を示しており、斜め配列によるスターラップの負担の軽減はあまり見られなかった。したがって、繊維の配列方向が補強効果に及ぼす影響については、更に検討が必要である。

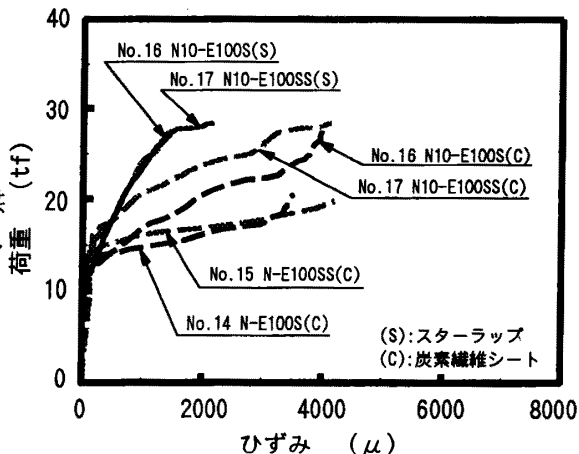


図-6 荷重とひずみの関係

3. 3 損傷を受けた部材に対するシートの補強効果

No.18およびNo.19供試体はスターラップが降伏し始める21tf（斜めひびわれ発生荷重は約10tf）まで損傷を与え、荷重を除荷した状態で炭素繊維シートを巻き付けてせん断補強を行った。シート補強前に載荷した21tfは、シート補強前のはりの耐力である25.25tfの83%に相当する。

No.18およびNo.19供試体の最大荷重は、34.50tfおよび35.65tfであった。健全な供試体に同じ補強を施したNo.6およびNo.10供試体の最大荷重は、33.76tfおよび33.81tfであることから、損傷後の補強による耐力の低下は見られなかった。したがって、スターラップが降伏する程度まで損傷を受けた部材に、せん断補強材として炭素繊維シートを巻き付けた場合、健全な部材に補強したときと同等の効果が得られるものと考えられる。

図-7にNo.6およびNo.18供試体の荷重とたわみの関係を示す。No.18供試体は、損傷を与えた21tfまでは炭素繊維シートによる補強がないため、No.6の供試体に比べてせん断変形量が大きくなっている。しかし、シートにより補強した後に再載荷した時の21tf以降のたわみの挙動は、No.6供試体の挙動に類似している。したがって、スターラップが降伏する程度の損傷を受けたコンクリート部材に炭素繊維シートを巻き付けて補強することにより、部材の変形性状は改善され、補強後の部材の挙動は、健全な部材に補強した場合の挙動と同等のものになるものと考えられる。

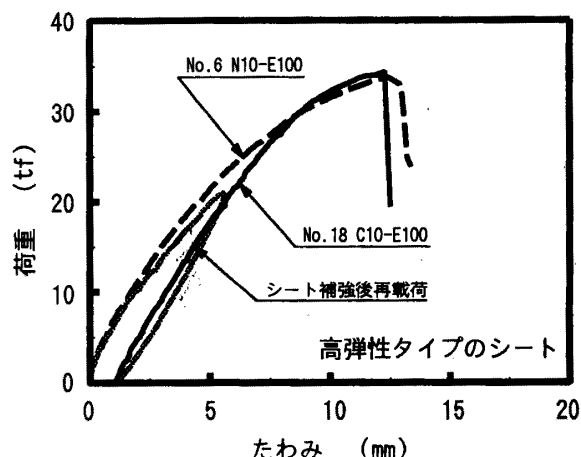


図-7 荷重とたわみの関係

4. まとめ

- (1) 炭素繊維シートをせん断補強材として鉄筋コンクリートはりに巻き付けた場合、スターラップの有無に関わらずせん断耐力は増加する。シートとスターラップを併用することにより、せん断力に対するスターラップの負担は軽減し、その割合はシートの弾性係数の影響を受ける。
- (2) せん断補強として炭素繊維シートを側面に接着した場合、補強の効果はシートとコンクリートの接着強度に大きく依存する。本研究では、接着切れによるシートの剥離で破壊に至り、巻き付け補強した時と同等のシートの補強効果は得られなかった。
- (3) スターラップが降伏する程度の損傷を受けたコンクリート部材に炭素繊維シートを巻き付けて補強すると、シートのせん断補強効果は、健全な部材に補強したときと同等の評価ができる。

【謝辞】

本研究で使用した炭素繊維シートはショーボンド建設(株)より提供して頂きました。実験に際しては立命館大学大学院 東野幸史君の協力を得ました。ここに記して感謝の意を表します。

【参考文献】

- [1]加藤, 児島, 高木, 足立: 炭素繊維シートによるコンクリート部材の補強に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.17, No.2, pp.899-904, 1995 [2]朝倉, 谷垣, 小田: 高強度繊維巻付けによる既存RC柱のせん断補強, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.16; No.1, pp.1061-1066, 1994 [3]奥出, 新田, 狩野: せん断補強筋の強度がRC梁のせん断耐力に及ぼす影響について, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.10, No.3, pp.623-628, 1988