

論文 炭素繊維シートによる RC はりのせん断補強に及ぼす ケミカルプレストレスの影響

東野幸史*1・児島孝之*2・高木宣章*3・濱田 謙*4

要旨：膨張ペーストの注入により予め緊張した炭素繊維シートが、はりのせん断耐力の分担あるいは変形性能に及ぼす影響、およびアルカリ骨材反応により損傷した既存コンクリート構造物のせん断補強へのシートの有効性について検討した。シートを緊張することにより、斜めひびわれ発生直後からシートはせん断力を効果的に負担することができる。アルカリ骨材反応により損傷した部材を炭素繊維シートでせん断補強する効果は、健全な部材を補強したときと同等に評価することができる。

キーワード：炭素繊維シート、せん断補強、せん断耐力、ケミカルプレストレス、アルカリ骨材反応

1. はじめに

炭素繊維シートによる既存コンクリート構造物のせん断補強は、阪神大震災以降多く施工されてきた。これらの補強工事では、シートを緊張することなく、構造物へシートを樹脂で接着する工法が取られている。本研究は、膨張ペーストの注入により炭素繊維シートを予め緊張し、斜めひびわれ発生直後からシートがせん断力をより効果的に負担できるように、また、アルカリ骨材反応などにより損傷した既存コンクリート構造物のせん断補強へのシートの有効性を検討することを目的として、鉄筋コンクリートはりの曲げせん断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。シリーズ1では、膨張ペーストの注入により予め緊張した炭素繊維シートがはりのせん断耐力および変形性状に及ぼす影響を検討する。タイプA供試体は通常行われているシートを樹脂ではりに接着したものであり、タイプB供試体は樹脂で固めたシートとはり供試体の間に膨張ペーストを注入することによりシートを予め緊張したはりである。注入ペーストの膨張材量として2水準選定した。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合せて、せん断補強量を変化させた。

シリーズ2では、アルカリ骨材反応などにより損傷を受けたはりのせん断耐力向上へ及ぼす炭素繊維シートの効果について実験検討する。アルカリ骨材反応などにより劣化したコンクリートをモデル化するために、膨張材を用いて強度低下を与えた。劣化コンクリートはせん断スパンのみに使用し、曲げスパンには健全なコンクリートを使用した。スターラップ量は一定にし、炭素繊維シートの目付量および弾性係数を変化させた。シリーズ2供試体に対するシートの接着は、シリーズ1のタイプA供試体と同じ方法である。表-1に示すせん断補強比(p_w)とせん断補強量

- | | | | |
|----|----------|----------------------|---------|
| *1 | 立命館大学大学院 | 理工学研究科博士前期課程環境社会工学専攻 | (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 | 立命館大学大学院 | 理工学研究科博士後期課程総合理工学専攻 | 工修(正会員) |

表-1 供試体の要因および名称

せん断補強材		シリーズ1						シリーズ2			
炭素繊維シート		タイプA			タイプB						
目付量	種類	スターラップ ^o	供試体名	p _w	p _w ・σ _w	供試体名	p _w	p _w ・σ _w	供試体名	p _w	p _w ・σ _w
(g/m ²)				(%)	(N/mm ²)		(%)	(N/mm ²)		(%)	(N/mm ²)
未使用		--	Na	0.000	0.00	Nb	0.000	0.00	--	--	--
		D6@10cm	Na10	0.422	1.48	Nb10	0.422	1.48	Db10	0.422	1.48
100	高弾性	--	Na-E100	0.072	1.84	Nb-E100	0.072	2.11	--	--	--
		D6@10cm	Na10-E100	0.494	3.32	Nb10-E100	0.494	3.59	Db10-E100	0.494	3.59
	高強度	--	Na-H100	0.074	2.78	Nb-H100	0.074	2.89	--	--	--
		D6@10cm	Na10-H100	0.496	4.26	Nb10-H100	0.496	4.36	Db10-H100	0.496	4.36
200	高弾性	--	Na-E200	0.144	3.69	Nb-E200	0.144	4.22	--	--	--
		D6@10cm	Na10-E200	0.566	5.16	Nb10-E200	0.566	5.70	Db10-E200	0.566	5.70
	高強度	--	Na-H200	0.148	5.57	Nb-H200	0.148	5.77	--	--	--
		D6@10cm	--	--	--	--	--	--	Db10-H200	0.570	7.25

(p_w・σ_w)は、式(1)および式(2)より算出した。

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

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

ここで、A_s：スターラップ1本の断面積、s：スターラップ間隔、

b_{cf}：炭素繊維シートの設計厚さ、b_w：はりの断面幅、

σ_s：スターラップの降伏強度、σ_{cf}：炭素繊維シートの引張強度

2.2 使用材料

実験に使用した炭素繊維シートは、繊維系を1方向に配列したもので、繊維系の交錯による屈曲がない構造となっている。炭素繊維シートの力学的特性を表-2に示す。高弾性タイプと

表-2 炭素繊維シートの力学的特性

種類	目付量(g/m ²)	比重	設計厚さ(mm)	シリーズ1(タイプA)		シリーズ1(タイプB),シリーズ2	
				引張強度(N/mm ²)	弾性係数(N/mm ²)	引張強度(N/mm ²)	弾性係数(N/mm ²)
高弾性	100	1.84	0.0543	2510	4.33x10 ⁵	2870	4.33x10 ⁵
	200	1.84	0.1086	(4210)	(4.36x10 ⁵)	(4210)	(4.36x10 ⁵)
高強度	100	1.80	0.0556	3680	2.24x10 ⁵	3820	2.24x10 ⁵
	200	1.80	0.1111	(4900)	(2.30x10 ⁵)	(4900)	(2.30x10 ⁵)

()内の数値は炭素繊維単体の特性

高強度タイプの2種類の炭素繊維シートを使用し、目付量は100g/m²および200g/m²の2水準とした。シートの接着には、エポキシ樹脂系接着剤を使用した。シリーズ1のタイプB供試体に使用した膨張ベストの水結合材比は60%、シリカフェームは結合材質量の内割で20%、膨張材(エトリンサイト系)は結合材質量の内割で40%および55%の2水準使用した。コンクリートの示方配合を表-3に、コンクリートの諸強度を表-4に示す。配合Iはシリーズ1のタイプA供試体に、配合IIはシリーズ1のタイプB供試体とシリーズ2供試体の曲げスパンに使用した。配合IIIの膨張コンクリートは、シリーズ2供試体のせん断スパンに使用し、膨

表-3 コンクリートの示方配合

配合No.	シリーズ	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					混和剤(cc/m ³)	
				W	C	EP	S	G	AE減水剤	AE助剤
I	1(タイプA)	60	46	174	290	--	824	1008	2900	1450
II	1(タイプB)	60	46	174	290	--	824	1008	2900	870
	2(普通)*									
III	2(膨張)*	60	46	174	217	73	821	1005	2900	870

注) EP: 膨張材 AE減水剤は25%溶液、AE助剤は1%溶液で使用

*; 普通: 普通コンクリート(曲げスパン)、膨張: 膨張コンクリート(せん断スパン)

表-4 コンクリートの諸強度

シリーズ	種類	28日強度(N/mm ²)		載荷時強度(N/mm ²)	
		圧縮強度	弾性係数	圧縮強度	弾性係数
シリーズ1	タイプA	26.0	2.98x10 ⁴	31.0	3.13x10 ⁴
	タイプB	35.8	3.19x10 ⁴	38.6	3.27x10 ⁴
シリーズ2	普通*	36.1	3.43x10 ⁴	39.1	3.47x10 ⁴
	膨張*	2.16	0.40x10 ⁴	3.72	0.46x10 ⁴

注) *; 普通コンクリート: 曲げスパン、膨張コンクリート: せん断スパン

表-5 鋼材の力学的特性

使用箇所	材質および径	シリーズ	降伏強度(N/mm ²)	引張強度(N/mm ²)	弾性係数(N/mm ²)
スターラップ ^o	SD295, D 6	1, 2	343	539	2.06x10 ⁵
圧縮鉄筋	SD345, D10	1, 2	392	578	2.06x10 ⁵
引張鋼材	ケビトン ^o スターラップ ^o , φ23	1(タイプA)	1102	1224	2.04x10 ⁵
		1(タイプB), 2	1047	1136	2.03x10 ⁵

張材（エトリンナイト系）量は配合IIのセメント質量の内割で25%とした。

使用した鋼材の力学的特性を表-5に示す。異形P C鋼棒（ケビンデスターフ、 $\phi 23$ ）は、供試体をせん断破壊させるために引張鋼材として使用し、緊張せず定着板により供試体端部に定着させた。

2.3 供試体および試験方法

供試体の補強状況および荷重条件を図-1に示す。供試体寸法は15x24x200cm、有効高さは20cmした。シリーズ1および2とも、引張鋼材として異形P C鋼棒を2本、圧縮鉄筋として異形鉄筋（SD345, D10）を2本配置した。シートは部材軸に対して直角となるように一層全面巻き付けとし、コーナー部に半径1cmの面取りを設けた。ひずみゲージは図-1に示すようにスターラップとシートが対応する位置に貼付した。供試体はコンクリート打設後1週間散水養生を行い、その後荷重試験まで気中保管した。シリーズ1のタイプA供試体およびシリーズ2供試体へのシート接着は、材齢28日から実施した。供試体表面処理後、表面に樹脂を塗布した後にシートを貼りつけ、その上から樹脂を含浸させた。シート接着後1週間室内で養生の後、荷重試験を実施した。膨張ペーストによりシートを予め緊張するシリーズ1のタイプB供試体は、材齢約7週に図-1(c)に示すように予め樹脂で固めたシートを供試体に取り付け、シートと供試体間の隙間にペーストをグラウトポンプを使用して注入した。膨張ペースト注入後、約10日間の室内養生後、荷重試験を実施した。荷重条件は、支点間距離160cm、曲げスパン80cmの2点集中単調荷重とした。せん断スパン有効高さ比(a/d)は2.0とした。

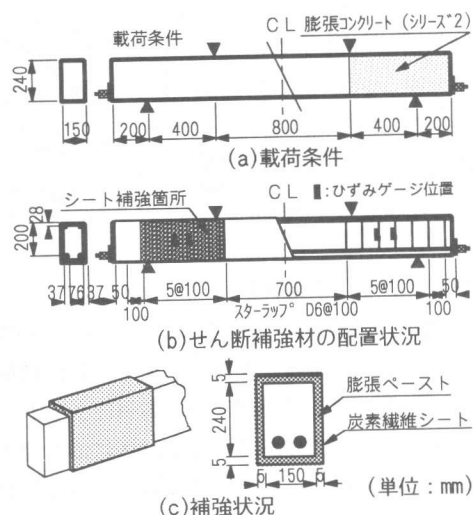


図-1 供試体の補強状況および荷重条件

膨張ペーストによりシートを予め緊張するシリーズ1のタイプB供試体は、材齢約7週に図-1(c)に示すように予め樹脂で固めたシートを供試体に取り付け、シートと供試体間の隙間にペーストをグラウトポンプを使用して注入した。膨張ペースト注入後、約10日間の室内養生後、荷重試験を実施した。荷重条件は、支点間距離160cm、曲げスパン80cmの2点集中単調荷重とした。せん断スパン有効高さ比(a/d)は2.0とした。

3. 実験結果および考察

シリーズ1のタイプA供試体は、シリーズ1のタイプB供試体およびシリーズ2供試体と比較検討するために、既報告の実験結果[1]を使用している。

3.1 膨張ペーストによるシート緊張の影響(シリーズ1)

シリーズ1の実験結果および計算耐力を表-6に示す。斜めひびわれ発生荷重およびスターラップの降伏荷重は、荷重とスターラップおよびシート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。曲げ破壊したNa-H200供試体の一例を除き、全ての供試体はせん断破壊により、終局に至った。

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

ここで、 V_c ：せん断補強鋼材を用いない棒部材のせん断耐力

$$V_c = 0.20 \beta_a \cdot \beta_p (f'_c)^{1/3} \cdot \{0.75 + 1.4/(a/d)\} b_w \cdot d$$

$$\beta_a = (100/d)^{1/4}, \quad \beta_p = (100 p_w)^{1/3}, \quad d: \text{有効高さ}, \quad p_w = A_s / b_w \cdot d$$

V_w ：せん断補強材により受け持たれるせん断耐力

$$V_w = (p_w \cdot \sigma_w) \cdot b_w \cdot z, \quad (p_w \cdot \sigma_w) \text{は式(2)による}$$

表-6 荷重試験結果および計算耐力(シリーズ1)

		シリーズ1																				
タイプA		タイプB																				
供試体名	計算値(kN)		実験結果(kN)				供試体名	計算値(kN)		実験結果(kN)												
	$P_{\mu u}$	$P_{\nu u}$	P_{vcr}	P_{sy}	P_u	形式		実/計	EP=40%		EP=55%											
Na		115	100	-	130	S	1.13	Nb		125	105	-	153	S	1.22	-	-	-	-			
Na10		192	115	235	253	S	1.31	Nb10		202	120	220	305	S	1.51	-	-	-	-			
Na-E100		211	131	-	319	S*	1.51	Nb-E100		235	141	-	180	S**	0.77	175	-	283	S*	1.20		
Na10-E100	417	288	135	327	338	S*	1.17	Nb10-E100	427	312	160	280	333	S*	1.07	181	300	338	S*	1.08		
Na-H100			260	132	-	298	S*	1.14		Nb-H100		276	132	-	295	S*	1.07	149	-	300	S*	1.09
Na10-H100			337	130	299	338	S*	1.00		Nb10-H100		353	143	250	400	S*	1.13	150	300	475	S*	1.35
Na-E200			307	142	-	330	S*	1.07		Nb-E200		345	-	-	-	-	150	-	208	S**	0.60	
Na10-E200			384	145	365	411	S*	1.07		Nb10-E200		422	-	-	-	-	187	360	454	S*	1.08	
Na-H200			405	137	-	358	F	0.88		Nb-H200		426	-	-	-	-	160	-	371	S*	0.87	

注) $P_{\mu u}$: 曲げ破壊荷重 $P_{\nu u}$: せん断破壊荷重 P_{vcr} : 斜めひびわれ発生荷重 P_{sy} : スターラップ降伏荷重 P_u : 最大荷重
 S: せん断圧縮破壊 F: 曲げ破壊 実/計: (実験値)/(計算値)
 *: 炭素繊維シートの破断によって破壊した供試体 **: \angle -ス注入が不十分で、はりの圧縮コーナ部に沿ってシートが破断

3. 1. 1 変形性状

荷重とせん断補強材のひずみの関係の例を図-2に示す。シート破断ひずみは、タイプB供試体に使用した高強度シートで17000 μ 、高弾性シートで6600 μ である。測定位置あるいは供試体により変動は大きいものの、膨張ペーストの注入により荷重試験直前までに膨張材量40%および55%使用時に、高強度シートでは各々約3000 μ 、4000~4500 μ 、高弾性シートでは各々約1500 μ 、3000 μ のひずみが生じた。シートを予め緊張したタイプB供試体と緊張していないタイプA供試体では、せん断補強材のひずみの変化に大きな差が観察された。斜めひびわれ発生後、タイプB供試体(Nb10)のスターラップとシートのひずみ増加率はほぼ等しく、シートが斜めひびわれ発生直後からせん断力を効果的に負担している。一方、タイプA供試体(Na10)では、斜めひびわれ発生後のシートの負担せん断力が小さく、その後スリップするように急激にひずみが増加した後に、タイプB供試体と同様にせん断力を負担する。シートを予め緊張することにより、シートひずみのスリップ現象が現れず、斜めひびわれ発生直後からシートが効果的にせん断力を負担しているものと考えられる。

3. 1. 2 せん断耐力

せん断破壊荷重とせん断補強量の関係を図-3に示す。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のせん断スパンに巻き付けることにより、スターラップの有無にかかわらずせん断耐力は増加すること、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

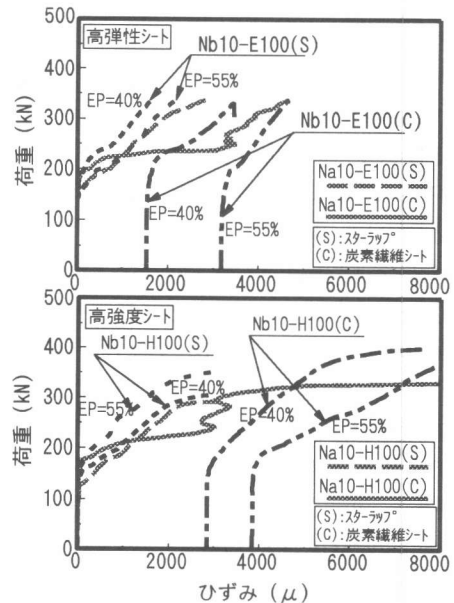


図-2 荷重とせん断補強材のひずみの関係 (シリーズ1)

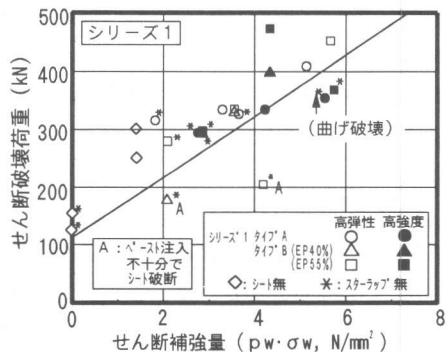


図-3 せん断破壊荷重とせん断補強量の関係

は軽減し、その割合はシートの弾性係数の影響を受けることは既に報告した[1][2]。Nb-E100供試体(EP=40%)とNb-E200供試体(EP=55%)のせん断耐力の実験値は、計算値を下回る結果となり、シートははりの圧縮コーナー部に軸方向に破断していた。これら2つの供試体の载荷試験後の観察から、シート破断箇所周辺へのペーストの注入が不十分であったことがシートの破断およびそれに伴うせん断耐力の低下の原因であることが明かとなった。ペーストの注入が十分な供試体においてもシートの破断箇所は、シートの種類および供試体によりばらつきが大きいものの、はりのコーナー部で多く観察された。

曲げ破壊したNa-H200供試体、ペースト注入が不十分でシートが早期に破断した2供試体を除くと、幾分の例外と変動はあるものの、シートの緊張の有無にかかわらず、せん断破壊した供試体の実験値は計算値を上回っており、安全側の値を示した。膨張ペーストの注入が適切であれば、せん断耐力は、せん断補強量をパラメーターとして安全側に評価することができる。

3.2 損傷コンクリートの影響 (シリーズ2)

シリーズ2の実験結果および計算耐力を表-7に示す。シリーズ2のはりの曲げスパンには配合IIの普通コンクリートを、せん断スパンには配合IIIの膨張コンクリートを使用している。膨張コンクリート(φ10x20cm)の動弾性係数と音速は、普通コンクリートに比較して各々80%、40%低下している、圧縮強度の低下は約90%程度であり、大きな損傷を受けている。

表-7 载荷試験結果および計算耐力 (シリーズ2)

シリーズ1 (タイプA)								シリーズ2							
供試体名	計算値(kN)		実験結果(kN)					供試体名	計算値(kN)		実験結果(kN)				
	P_{mu}	P_{vu}	P_{ver}	P_{sy}	P_u	形式	実/計		P_{mu}	P_{vu}	P_{ver}	P_{sy}	P_u	形式	実/計
Na10		192	115	235	253	S	1.32	Db10		203	150	175	277	S	1.36
Na10-E100	417	288	135	327	338	S*	1.17	Db10-E100	428	313	184	237	348	S*	1.11
Na10-H100		337	130	299	338	S*	1.00	Db10-H100		353	175	225	365	S*	1.03
Na10-E200		384	145	365	411	S*	1.07	Db10-E200		423	200	250	412	S*	0.97
Na10-H200		-	-	-	-	-	-	Db10-H200		504	190	230	420	F	0.83

注) P_{mu} : 曲げ破壊荷重 P_{vu} : せん断破壊荷重 P_{ver} : 斜めひびわれ発生荷重 P_{sy} : スターラップ°降伏荷重
 P_u : 最大荷重 S: せん断圧縮破壊 F: 曲げ破壊 実/計: (実験値)/(計算値)
 *: 炭素繊維シートでの破断によって破壊した供試体

3.2.1 変形状

荷重とせん断補強材のひずみの関係の例を図-4に示す。膨張コンクリートの使用によるケミカルプレストレスの導入により、スターラップひずみは変動はあるものの、载荷試験直前で1000~1500μであった。せん断スパンに膨張コンクリートを使用することにより導入されるケミカルプレストレスのために、斜めひびわれ発生荷重は大きくなる。せん断補強量が大きくなると、斜めひびわれ発生荷重は更に大きくなる。最大荷重は、損傷コンクリート、健全なコンクリートに関わらずほぼ同程度であり、また、シートの弾性係数が荷重-ひずみ関係へ及ぼす著しい影響は観察されなかった。

荷重とたわみの関係の例を図-5に示す。せん断補強量が大きくなると、せん断スパン内の曲げせん断ひびわれの発生が少なくなるので、曲げ剛性が大きくなり、たわみは小さくなる。また、

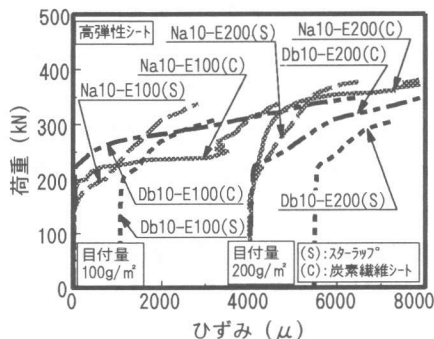


図-4 荷重とせん断補強材のひずみの関係 (シリーズ2)

膨張材により導入されるケミカルプレストレスのためにせん断補強量がほぼ同じ供試体であっても、同様にたわみは小さくなる。

3.2.2 せん断耐力

せん断破壊荷重とせん断補強量の関係を図-6に示す。曲げ破壊したDb10-H200供試体の一例を除き、全てせん断破壊した。スターラップの膨張拘束によりケミカルプレストレスが導入されているため、せん断スパンに膨張コンクリートを使用したシリーズ2供試体の斜めひびわれ発生荷重は、普通コンクリートを使用したシリーズ1のタイプA供試体より増加している。スターラップとシートを併用し、せん断補強量がほぼ同等の供試体であれば、せん断スパンに損傷コンクリートを使用しても、はりのせん断体力は低下することなく、健全なコンクリートを使用しているシリーズ1・タイプA供試体と同等以上であった。シリーズ2のせん断耐力は、シリーズ1(タイプA)同様に、せん断補強量に伴い増加し、実験値は計算値を上回っている。損傷コンクリートを有する部材のせん断補強も、通常の部材同様にせん断補強量をパラメータとして評価できる。

4. 結論

本研究で得られた結論は、以下のとおりである。

- (1) 膨張ペーストを使用して予め炭素繊維シートを緊張することにより、シートひずみのスリップ現象が現れず、斜めひびわれ発生直後からシートはせん断力を効果的に負担することができる。
- (2) 炭素繊維シートを緊張することにより、斜めひびわれ発生荷重は増加する。
- (3) 膨張ペーストの注入が適切であれば、せん断耐力はせん断補強量をパラメータとして安全側に評価することができる。
- (4) 膨張材の使用により強度低下し損傷を受けたコンクリート部材を炭素繊維シートでせん断補強する効果は、健全なコンクリート部材を補強したときと同等に評価することができる。

【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。ここに記して感謝の意を表します。

【参考文献】

- [1] 加藤、見島、高木、濱田, "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", コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18 No.2, pp.101-106, 1996
- [2] 加藤、見島、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

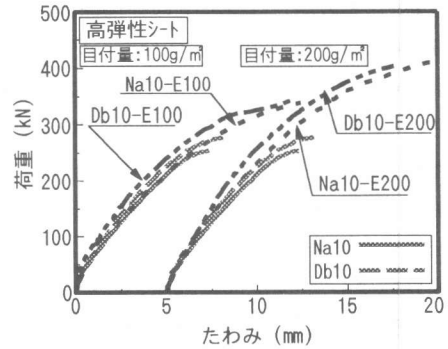


図-5 荷重とたわみの関係 (シリーズ2)

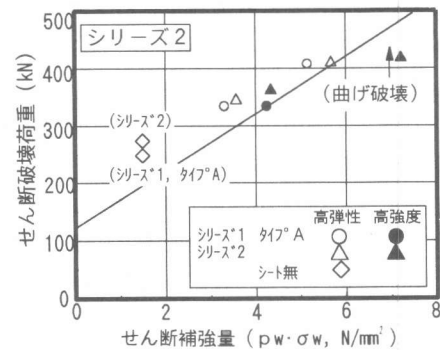


図-6 せん断破壊荷重とせん断補強量の関係