

表－1 RCはり供試体の概要

はり供試体名	増厚工法	増厚用PCM	界面処理剤の種類	a/d	せん断スパン (mm)	補強筋の有効高さ d_2 (mm)	主鉄筋	増厚部補強鉄筋	スターラップ間隔 (mm)
N-3.0-D13	－	－	－	3.0	450	－	D13-2	－	75
N-3.0-D13-hunch	－	－	－	3.0	450	－	D13-2	－	75
HP1-3.0-D13-D6-ac	吹付け	高靱性-1	アクリル	3.0	450	173	D13-2	D6-2	75
HP1-3.0-D13-D6-ac-hunch	吹付け	高靱性-1	アクリル	3.0	450	173	D13-2	D6-2	75
N-2.6-D13	－	－	－	2.6	390	－	D13-2	－	－
N-2.6-D16	－	－	－	2.6	390	－	D16-2	－	－
HP1-2.6-D13-D6-ac	吹付け	高靱性-1	アクリル	2.6	390	173	D13-2	D6-2	78
HP1-2.6-D16-D6-ac	吹付け	高靱性-1	アクリル	2.6	390	173	D16-2	D6-2	78
HP1-2.6-D16-D10-ac	吹付け	高靱性-1	アクリル	2.6	390	175	D16-2	D10-2	78
HP2-2.6-D16-D10-ac	吹付け	高靱性-2	アクリル	2.6	390	175	D16-2	D10-2	78
SP1-2.6-D16-D10-ac	吹付け	汎用型	アクリル	2.6	390	175	D16-2	D10-2	78
HP1-2.6-D16-D10-no	吹付け	高靱性-1	無処理	2.6	390	175	D16-2	D10-2	78
HP1-2.6-D16-D10-ep	吹付け	高靱性-1	エポキシ	2.6	390	175	D16-2	D10-2	78
PO-2.6-D16-D10-ac	流し込み	高靱性-3	アクリル	2.6	390	175	D16-2	D10-2	78

点とし、高さ50mm、勾配1：3のハンチを設けた。

実験要因は、下面増厚工法の種類（吹付け、流し込み）、下面増厚材料の種類（高靱性PCMを3配合、汎用品PCMは1配合）、打継ぎ界面の処理方法、a/d、主鉄筋量、軸方向の補強鉄筋量である。

はり供試体の作製は、最初に呼び強度値27N/mm²のコンクリートを用いて母材となるRCはりを打設した。コンクリート強度が27N/mm²に達した後に、母材との一体性を確保するために母材コンクリート表面をディスクサンダーケレンにて処理した。次に、M8ボルトに補強鉄筋を固定し、吹付け施工、流し込み施工とともに、既設部界面にアクリル系ポリマーディスパージョンを塗布した後、各種PCMを増厚した。なお、エポキシ系プライマー塗布および打継ぎ処理無しの供試体も各々1体作製した。また、吹付け施工は湿式（ノズル先端チップ径16mm、コンプレッサ吐出圧力0.7N/mm²）で実施した。養生はPCM施工後28日間はドライアウトを防ぐため湿空養生を行い、その後試験に供するまでは気中養生とした。

載荷方法は、図－1に示す4点対称載荷とした。測定項目は、スパン中央たわみ、コンクリートひずみおよび鉄筋ひずみ、ひび割れ幅、ひび割れ進展状況、打継ぎ界面のずれ量などである。

2.2 使用材料および配合

本実験では、材料特性と施工法の異なる4種類のPCMを増厚材料として使用した。RC部に用いたコンクリートの配合とともにPCMの配合を表－2に示す。コンクリートは目標スランプ15cm、目標空気量4.5%のAEコンクリートとした。PCMのフレッシュ性状の管理値は、吹付け配合ではPCM用スランプ値（JIS A 1171）が45±25mm、流し込み配合は、コンクリート用スランプフロー値が練上り時で600±50mmとした。また、PCMの結合材(B)にはセメント、フライアッシュ、膨張材などを、混和剤にはポリマー(P)及び減水剤を適量用いた。

表－2 コンクリートおよびPCMの配合

配合の種類	W/B (%)	S/B	P/B (%)	V _f vol.%	繊維 の種類	適用工法
コンクリート	51	－	－	－	－	既設RC部に打設
高靱性PCM-1	34	0.7	1.7	1.1	PE①	高靱性PCM吹付け
高靱性PCM-2	30	0.3	1.0	1.5	PE②	高靱性PCM吹付け
汎用型PCM	33	1	1.0	0.2	PVA①	汎用型PCM吹付け
高靱性PCM-3	48	1.1	6.6	2.0	PVA②	高靱性PCM流し込み

注) W：水，B：結合材，P：ポリマー，V_f：繊維体積混入率

PE：ポリエチレン繊維，PVA：ビニロン繊維

表－3 使用した短繊維の諸元と物性

繊維種類	繊維長 (mm)	繊維径 (μm)	密度 (g/cm ³)	引張強度 (N/mm ²)	破断伸び (%)	引張弾性率 (kN/mm ²)
PE①	9	12	0.97	2600	3.0	88.0
PE②	12	12	0.97	2600	3.0	88.0
PVA①	6	26	1.3	1510	5.5	34.3
PVA②	12	40	1.3	1600	6.0	40.0

表－4 使用した鉄筋の機械的性質

鉄筋種類	適用箇所	降伏応力 (N/mm ²)	降伏ひずみ (μ)	弾性係数 (kN/mm ²)
D13	主鉄筋	357	1785	200
D16	主鉄筋	350	1750	200
D6	せん断補強筋	370	1850	200
D6	増厚部補強筋	487	2435	200
D10	増厚部補強筋	348	1740	200

PCMに混入したポリエチレン繊維（PE）およびビニロン繊維（PVA）の諸元と物性を表－3に、RCはり供試体に用いた鉄筋の機械的性質を表－4に示す。

2.3 材料特性

RCはり載荷試験時のコンクリートおよびPCMの強度特性を材齢28日強度とあわせ表－5に示す。載荷時の材齢は60～90日である。ここで、各種強度試験は、はり供試体毎に実施したが、載荷試験期間内での材齢の影響は非常に小さかったので、各材料の平均値を示している。また、高靱性PCMの引張強度は土木学会HPFRCC指針に準じた一軸直接引張試験により求めた。代表的な高靱性PCMの引張応力-ひずみ曲線を図－2に示す。終局ひ

表－5 RCはり載荷試験時のコンクリートおよびPCMの強度特性

材料の種類	適用工法 (界面処理の方法)	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	引張降伏強度 (N/mm ²)	引張終局 ひずみ (%)	付着強度 (N/mm ²)
コンクリート	既設部に打設	39.0 [36.2]	31.1 [30.9]	3.21 [3.05]	－ －	－ －	－ －
高靱性PCM-1	吹付け (アクリル)	59.1 [43.3]	22.6 [19.5]	4.41 [3.02]	3.33 [2.32]	0.51 [0.93]	2.65
	吹付け (エポキシ)						2.32
	吹付け (無処理)						2.12
高靱性PCM-2	吹付け (アクリル)	77.4 [65.1]	19.2 [18.4]	7.73 [4.48]	5.55 [3.51]	0.36 [0.31]	2.66
		82.7 [67.5]	29.8 [26.0]	11.5* －	－ －	－ －	3.17
汎用PCM	吹付け (アクリル)	33.4 [28.6]	15.2 [14.6]	4.84 [3.41]	4.10 [2.86]	0.43 [1.46]	2.98

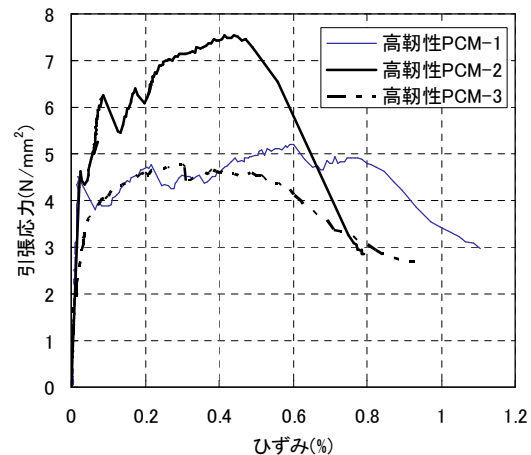
注) [] 内は28日・20℃湿布養生強度, *JCI-S-003-2007: 曲げ曲率試験による値

表－6 RCはり載荷試験結果の概要

はりの種類	降伏荷重 (kN)			終局荷重 (kN)				③/④	せん断余裕度		破壊形態
	①実験値	②計算値	①/②	③実験値	④計算値 (曲げ)	⑤計算値 (せん断)	⑥計算値 (せん断)		⑤/④	⑥/④	
N-3.0-D13	54.0	[53.9]	1.00	63.0	[56.0]	－	129.9	1.13	－	2.32	曲げ
N-3.0-D13-hunch	54.0	[53.7]	1.01	65.5	[56.6]	－	132.7	1.16	－	2.34	曲げ
HP1-3.0-D13-D6-ac	84.5	85.1	0.99	86.5	87.6	136.4	135.7	0.99	1.56	1.55	曲げ
HP1-3.0-D13-D6-ac-hunch	85.5	84.9	1.01	94.0	88.3	137.8	133.1	1.06	1.56	1.51	曲げ
N-2.6-D13	62.0	[62.1]	1.00	73.0	[65.3]	－	129.3	1.12	－	1.98	曲げ
N-2.6-D16	94.0	[93.4]	1.01	103.5	[96.5]	－	136.7	1.07	－	1.42	曲げ
HP1-2.6-D13-D6-ac	100.0	98.1	1.02	105.5	101.4	133.9	129.2	1.04	1.32	1.27	曲げ
HP1-2.6-D16-D6-ac	126.0	128.4	0.98	136.5	131.5	141.9	138.3	1.04	1.08	1.05	曲げ
HP1-2.6-D16-D10-ac	－	143.3	－	134.0	144.6	145.5	137.8	0.93	1.01	0.95	せん断剥離
HP2-2.6-D16-D10-ac	－	151.1	－	127.5	153.1	146.6	138.9	0.83	0.96	0.91	せん断剥離
SP1-2.6-D16-D10-ac	－	[131.3]	－	130.0	[133.3]	145.4	137.8	0.98	1.09	1.03	せん断圧縮
HP1-2.6-D16-D10-no	－	143.1	－	135.0	145.1	146.1	138.4	0.93	1.01	0.95	せん断剥離
HP1-2.6-D16-D10-ep	－	143.2	－	128.0	144.2	145.1	137.5	0.89	1.01	0.95	せん断付着
PO-2.6-D16-D10-ac	－	145.9	－	128.0	147.3	148.8	141.2	0.87	1.01	0.96	せん断剥離

注) 材料特性値は各はり毎の値を用いて計算, [] : コンクリートの引張無視, ⑤: 増厚後のせん断耐力, ⑥: 増厚前のせん断耐力

ずみは引張応力-ひずみ曲線における軟化開始点のひずみである。表－5より、高靱性PCMの終局ひずみは、材齢28日では吹付け高靱性PCM-1で0.93%、流し込み高靱性PCM-3で1.46%と土木学会HPFRCC指針の規定0.5%以上を満足している。しかし、材齢が経過してマトリクスの強度が大きくなった載荷試験時には、引張強度は向上しているが、終局ひずみは低下する傾向にあった。載荷時に0.5%以上の終局ひずみを確保できたのは、高靱性PCM-1のみであった。吹付け用高靱性PCM-2で0.36%、流し込み高靱性PCM-3で0.43%となった。高靱性PCM-1、高靱性PCM-2の特性は、筆者らの既往の研究²⁾と同様の結果であるが、流し込み配合では既往の研究では載荷時でも1.57%と大きな終局ひずみを示したが、今回は0.43%と小さい結果となった。汎用型PCMは、圧縮強度が最も大きく弾性係数もコンクリートと同程度である。また、高靱性PCM-3の弾性係数は、ポリマー混和量とPVA繊維混入量が多いため、コンクリートの50%程度の低い値であった。建研式による鉛直引張付着強度は、全てNEXCO「構造物施工管理要領」JHS416のコンクリートと断面修復材の付着強度の基準値1.5N/mm²以上を満足しており、破壊位置は無処理の場合も含めて全て既設部コン



図－2 代表的な高靱性PCMの引張応力-ひずみ曲線

リートであったことから、既設部コンクリートの引張強度よりも大きな付着強度を有していたと考えられる。

3. 実験結果および考察

3.1 破壊形態と耐力

RCはりの載荷試験結果を曲げ耐力、せん断耐力の計算値とあわせて表－6に示す。ここで、高靱性PCM下面増厚はりの降伏耐力および曲げ耐力の計算は土木学会

HPFRCC指針¹⁾に準じた。増厚前のせん断耐力の計算は2007年制定土木学会コンクリート示方書〔設計編〕(RC示方書)⁷⁾に準じ、増厚後のせん断耐力は、RC示方書式における引張鉄筋比を既設部の主鉄筋および増厚部補強鉄筋の合計断面積とし、両鉄筋の図心位置として求めた平均有効高さを適用し算定した。また、ひび割れと破壊の状況を図-3に示す。全ての下面増厚補強はりの耐力は無補強はりに比べ向上した。しかしながら、破壊形態は軸方向補強鉄筋量の増加と a/d の減少により作用せん断力が大きくなると、引張側鉄筋の降伏後に上縁コンクリートの圧壊により破壊する曲げ破壊から増厚界面の剥離や主鉄筋の付着破壊を伴うせん断破壊に移行した。

本実験における曲げ破壊からせん断破壊への移行は、 $a/d=2.6$ 、既設部主鉄筋D16-2本の断面に対してD10-2本で下面増厚補強した場合(補強後の主鉄筋比 $p=2.30\%$ 、せん断余裕度 $0.96\sim1.01$)に生じた。同一既設部に対してD6-2本で補強した場合まで($p=1.36\sim2.00\%$ 、せん断余裕度 $1.08\sim1.56$)は、曲げ破壊しており、降伏および終局耐力ともに実験値と計算値はよく一致している。しかし、曲げ破壊しなかった $a/d=2.6$ 、 $p=2.30\%$ の6体の下面増厚補強はりで、軸方向鉄筋が降伏する前に増厚部端部で界面剥離がクリップゲージの測定および目視で確認された。その後も荷重は向上したが、せん断ひび割れの進展に伴いせん断ひび割れ幅も増加し、最大荷重到達時ま

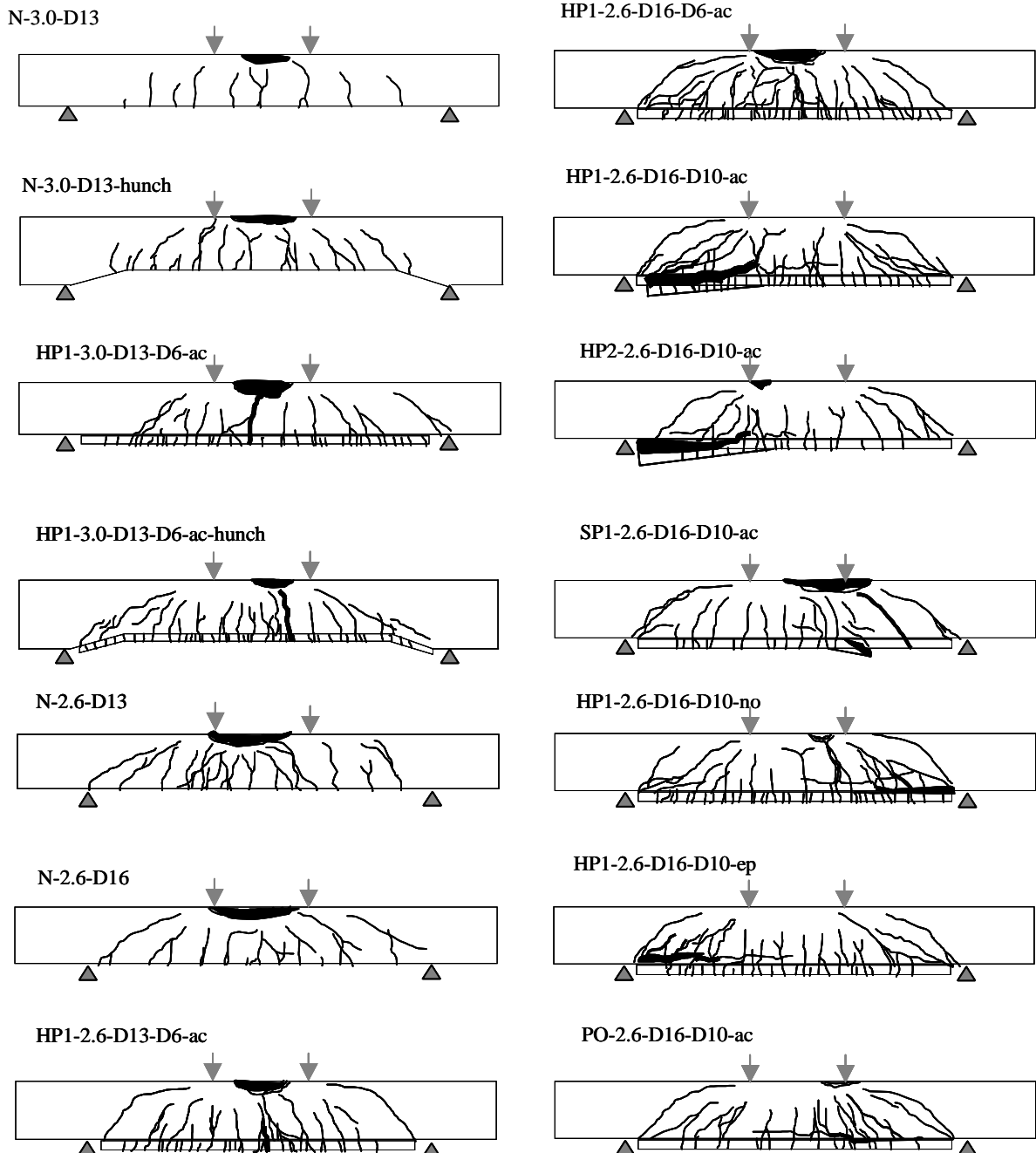


図-3 ひび割れ・破壊状況

たはその直後に大きな界面剥離あるいは主鉄筋の付着破壊を伴って最終的にせん断破壊により終局に至った。スターラップひずみの測定値によると、曲げ破壊した供試体のほとんどのスターラップは最大荷重時に降伏していなかったが、せん断破壊した全ての供試体でスターラップの降伏が認められた。このことから、界面剥離が生じた後は、せん断抵抗深さとして増厚部は期待できず、増厚前の断面で抵抗したためスターラップのせん断分担が大きくなり、既設はり部がせん断破壊し、端部剥離を伴ったものと考えられる。したがって、表-6には、増厚前のせん断耐力の計算値も記載した。なお、表-5に示したように付着強度は、打継ぎ処理を行っていない無処理でも 2.12N/mm^2 とJHS416の基準値 1.50N/mm^2 を十分に満足していたため、弾性範囲の小さい荷重での増厚部端部の界面剥離は生じず、比較的終局荷重近傍で発生し、せん断破壊した供試体の終局荷重に顕著な差が生じなかったものと考えられる。

汎用型PCMの場合、増厚部PCMの引張抵抗は期待できないため、曲げ補強効果が小さいことからせん断余裕度が高靱性PCM増厚はりよりも大きくなり、剥離を伴うせん断破壊ではなく、ひび割れ分散性が高靱性PCMに比べて低く、一つのせん断ひび割れの発達によって曲げ圧縮域コンクリートが減少することによるせん断圧縮破壊となった。したがって、この場合の終局耐力は、増厚部PCMは引張応力を負担しないと仮定した引張抵抗を無視した曲げ耐力の計算値と近い値となった。また、HP1-2.6-D16-D10-epは、打継ぎ界面ではなく既設部主鉄筋の付着破壊によるコンクリートの割裂を伴い最終的にせん断破壊した。この破壊もせん断剥離破壊した場合と同様、増厚端部から発生した斜めひび割れに起因している。橋梁床版ではハンチに補強鉄筋を定着することにより、この現象を抑制できるものと思われる。本実験でも、ハンチ付き供試体HP1-3.0-D13-D6-ac-hunchは、ハンチ無しのHP1-3.0-D13-D6-acと比較して、斜めひび割れが分散していたことから効果が期待できる。

3.2 変形状と破壊形態

全ての供試体が曲げ破壊した $a/d=3.0$ における荷重-スパン中央たわみの関係を図-4に示す。図より、高靱性PCM吹付け下面増厚により、降伏耐力で約1.6倍、曲げ耐力では約1.4倍の曲げ補強効果が得られた。 $a/d=2.6$ において曲げ耐力の計算値よりも小さい荷重にてせん断破壊した下面増厚補強はりの荷重-スパン中央たわみの関係を曲げ破壊した無補強はりおよび下面増厚補強はりとおわせて図-5に示す。下面増厚補強により補強前の母材に相当する無補強はりN-2.6-D16と比較して、剛性および終局耐力の向上がうかがえる。しかし、曲げ破壊した補強鉄筋量D6-2本のHP1-2.6-D16-D6-acよりも補強

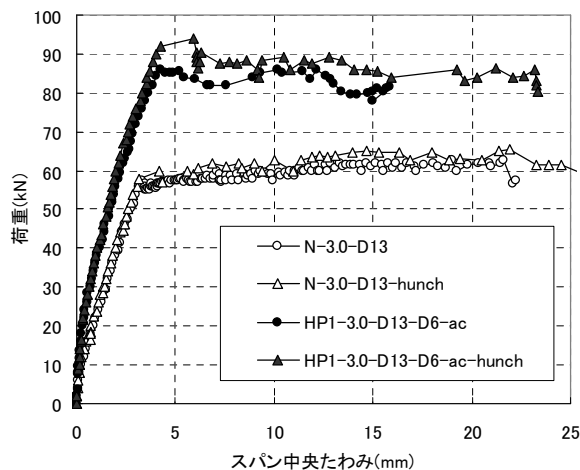


図-4 荷重-スパン中央たわみ曲線 ($a/d=3.0$)

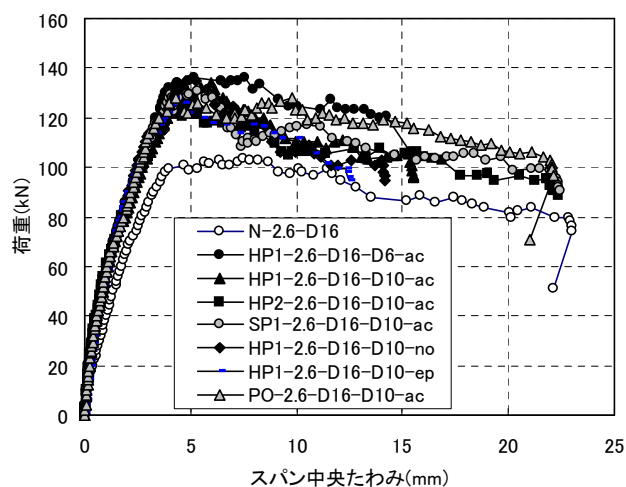


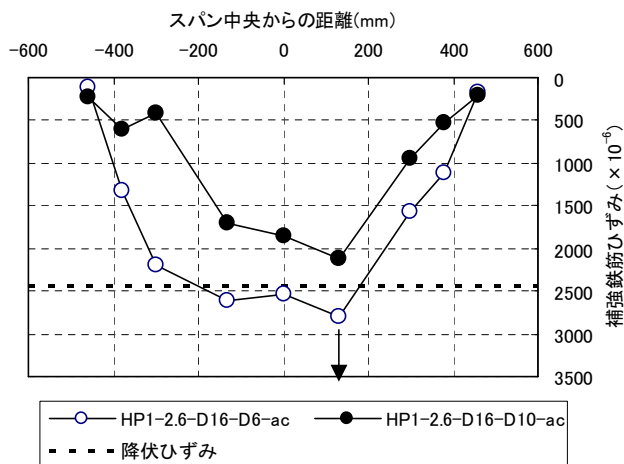
図-5 荷重-スパン中央たわみ曲線 ($a/d=2.6$)

鉄筋量D10-2本の全ての下面増厚補強はりの最大荷重は小さく、最大荷重到達後の荷重低下も急激であった。変形状に及ぼす増厚材料の種類、界面処理や増厚施工法の違いによる顕著な影響は認められなかった。

3.3 鉄筋ひずみと破壊形態

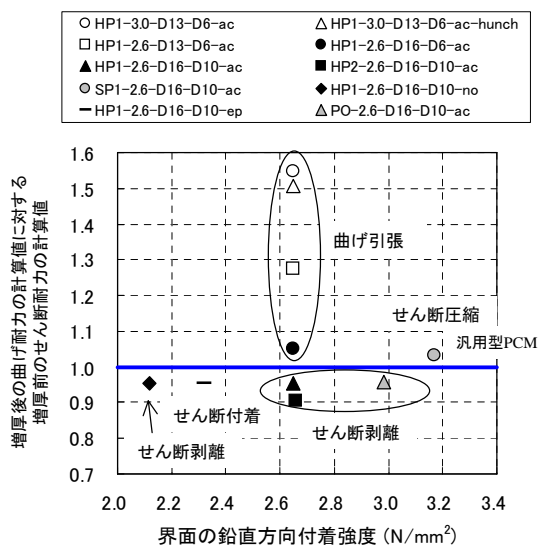
曲げ破壊のHP1-2.6-D16-D6-acとせん断剥離破壊したHP1-2.6-D16-D10-acの増厚部補強鉄筋の軸方向ひずみ分布を図-6に示す。ひずみはHP1-2.6-D16-D10-acの終局荷重である134kN時の値を用いている。図中の矢印はひずみゲージが測定不能となったため116kN時の値をプロットしていることを意味する。図より、曲げ破壊したHP1-2.6-D16-D6-acでは曲げスパン内のひずみが降伏ひずみを超え、全体的に下に山なりの形状をしており降伏後も既設部との一体性は保たれているものと考えられる。しかし、界面剥離を伴ってせん断破壊に至ったHP1-2.6-D16-D10-acでは界面剥離が生じたせん断スパン左側(-300mmの位置)でひずみが小さくなっている。また、鉄筋ひずみは降伏点に達していないことがわかる。

3.4 曲げ破壊からせん断破壊への移行判定について



図ー6 増厚部補強鉄筋ひずみの軸方向分布

破壊形態で述べたように、剥離が生じた増厚はりでは増厚によるせん断耐力の向上が期待できないことから、表一6中に示したせん断余裕度 (⑥/④) である増厚後の曲げ耐力の計算値 ($M_{u,cal}$) に対する増厚前のせん断耐力の計算値 ($V_{u,cal}$) と建研式による界面付着強度の関係を図ー7に示す。図より、 $V_{u,cal}/M_{u,cal}$ が1.0を下回ると高靱性PCM増厚はりの破壊形態は曲げ破壊からせん断破壊に移行することがわかる。PCMの付着強度の評価に一般的に用いられる建研式による付着強度は、全てJHS416の基準値1.50N/mm²を満足し、かつ既設部コンクリートで破壊したため、界面剥離が生じたものの増厚はりの破壊形態のせん断破壊への移行は、付着強度ひいては増厚材料の種類や界面処理方法に関係なく、せん断余裕度 ($V_{u,cal}/M_{u,cal}$) で判定できたと考えられる。



図ー7 せん断余裕度 ($V_{u,cal}/M_{u,cal}$) と付着強度の関係

4. まとめ

本実験の範囲内で以下の知見が得られた。

- (1) 全ての下面増厚補強したRCはりの終局耐力は無補強はりに比べ向上した。しかし、破壊形態は軸方向補強鉄筋量の増加とせん断スパン比の減少により作用せん断力が大きくなると、曲げ破壊から増厚界面の剥離や主鉄筋の付着破壊を伴うせん断破壊に移行し、高靱性PCMの引張抵抗を考慮した設計通りの曲げ補強効果が得られない。
- (2) せん断破壊した増厚はりでは、増厚端部で打継ぎ界面の剥離が終局荷重近傍で生じ、その後も荷重は向上したが、せん断ひび割れの進展に伴いせん断ひび割れ幅も増加し、最大荷重到達時あるいはその直後に大きな界面剥離あるいは主鉄筋の付着破壊を伴って最終的にせん断破壊により終局に至った。
- (3) PCMの界面付着強度試験の値が1.50N/mm²以上、かつ破壊位置が既設部コンクリートの場合、増厚材料の種類、打継ぎ界面の処理方法の違いが下面増厚補強はりの破壊形態に及ぼす影響は小さい。
- (4) せん断余裕度 (増厚後の曲げ耐力の計算値に対する増厚前のせん断耐力の計算値) が1.0を下回ると高靱性PCM増厚はりの破壊形態は曲げ破壊からせん断破壊に移行する可能性が高い。

参考文献

- 1) 土木学会：複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料設計・施工指針 (案)，コンクリートライブラリー127，2007.3
- 2) 水越睦視，川上明大，榊原弘幸，東山浩士：高靱性ポリマーセメントモルタルを用いた下面増厚によるRCはりの曲げ補強効果，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.2，pp.1363-1368，2010.7
- 3) 佐藤貢一，小玉克己，加納暢彦，前田哲哉：下面増厚したRCはりの補強剛性と破壊形態に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20，No.1，pp.563-568，1998.7
- 4) 古内 仁，恒岡 聡，角田興史雄，吉住 彰：吹付けモルタルで下面増厚したRC部材の耐荷性状について，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.1，pp.523-528，2000.6
- 5) 恒岡 聡，古内 仁，角田興史雄，吉住 彰：吹付けモルタルを用いた下面増厚補強RC部材におけるモルタルの剥離挙動について，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.2，pp.1573-1578，2002.6
- 6) 佐藤貢一，小玉克己：ポリマーセメントモルタル増厚補強したRCはりの剥離破壊性状に関する基礎的研究，土木学会論文集，No.746/V-61，pp.115-128，2003.11
- 7) 土木学会：コンクリート標準示方書 [設計編]，pp.132-137，2008.3