

論文 超高強度のシリカフェームコンクリートを用いた曲げ部材の静的および動的性能

小寺 満*1・土田伸治*2・丸山武彦*3

要旨：圧縮強度545～1770kgf/cm²までのRC，PCおよびPRCはりの静的曲げ試験、および、1210, 1363kgf/cm²のPCはりの曲げ疲労試験を行った。その結果、静的試験では超高強度シリカフェームコンクリートを用いた部材の曲げ破壊耐力は、 M_u/M_{ud} 比が多少小さくなる傾向を示すものの従来の計算方法ではば推定できること、靱性能の確保に横拘束筋の配置が有効であることがわかり、疲労試験では、100万回曲げ圧縮疲労強度は、実強度を用いた計算値 M_{ud} の70%程度であると推定された。

キーワード：高強度コンクリート、シリカフェーム、PCはり、曲げ圧縮破壊、曲げ疲労

1. はじめに

海外におけるシリカフェームの利用は、コンクリートの耐久性改善や高強度化を目的として多くの実績がある。わが国では現在、シリカフェームに関する研究が盛んに行われており、圧縮強度が1000kgf/cm²を超えるコンクリートを比較的容易に製造できるようになり、土木・建築の両方面における利用が検討され、一部には実用例も出はじめている。しかし、シリカフェームを用いて超高強度コンクリートを製造し、これを曲げ部材とした場合の性能に関する実験および研究報告はまだ少ない。シリカフェームを本格的な実用に至らしめるためには、部材の耐荷力の算定方法と実験値との整合性、破壊靱性、疲労特性などを検討したデータを蓄積することが必要である。

そこで本実験では、コンクリートの圧縮強度を500～1700kgf/cm²としたRC，PCおよびPRCはりの静的曲げ試験、およびPCはりの曲げ疲労試験を行い、超高強度のシリカフェームコンクリートを用いた曲げ部材の特性に関する検討を行った。

2. 実験概要

2.1 はりの静的曲げ試験

RC、プレテンションPCおよびPRCはりの静的曲げ試験に使用したシリカフェームコンクリートは、目標強度を500, 800, 1100, 1400, 1700kgf/cm²の5種類とし、シリカフェーム（比重2.20、SiO₂含有率94%、比表面積20m²/g）の混入率は外割りで15, 20, 30%とした。鉄筋はSD345, SD490, SD685, 異形PC鋼棒B種相当品の4種類、緊張材にはSWPR 1×7B φ15.2mmを用い、スターラップ筋には普通鉄線φ6mmを用いた。

試験体の種類は、表-1のようで、RCシリーズは、コンクリート強度と鋼材種類、PCおよびPRCシリーズは、コンクリート強度、有効プレストレス（緊張材本数）および曲げスパン内横拘束筋の有無をパラメータとした。RCシリーズの鉄筋比は釣合い鉄筋比に対して35～50%と

*1 日本コンクリート工業協会研究所 研究員、工修（正会員）

*2 日本コンクリート工業協会研究所 研究員、（正会員）

*3 日本コンクリート工業協会研究所 次長、工博（正会員）

にした。

試験方法は、表-4に示す条件で上限荷重を変え、ハイドロパルス疲労試験機を用いて表-5に示す100万回単位の載荷ステップで、荷重制御によって繰返し載荷を行った。

所定の繰返し回数において静的載荷による測定を行い、疲労破壊を起こすまで試験を継続した。下限モーメントは、両試験体ともPCはり下縁にそれぞれの圧縮強度に基づく設計引張応力度が発生するモーメントとし、各ステップを通じて一定とした。

3. 実験結果および考察

3.1 はりの静的曲げ試験

静的曲げ試験結果の一覧を表-6に示す。

(1) 使用限界状態について

使用限界状態の曲げモーメント (M_a) は土木学会示方書に準拠し、RCおよびPRCシリーズで許容ひび割れ幅 $w_a = 0.005C$ (C : かぶり)、PCシリーズで $w_a = 0.004C$ とした。 M_a の曲げ破壊の実測値 (M_u) に対する割合 (M_a/M_u) は、RCシリーズで $0.15 \sim 0.59$ 、PCシリーズで $0.45 \sim 0.56$ および PRCシリーズで $0.35 \sim 0.40$ であった。曲げ引張破壊をするRCシリーズの場合は、コンクリート強度の増加にしたがって M_a/M_u は低下するが、PCおよびPRCシリーズの場合は、プレストレス量を調節することでひび割れ制御を行い、 M_a/M_u 比の低下を抑えることができる。このように超高強度コンクリートとプレストレスを組み合わせることで、使用限界状態での抵抗モーメントを増加させることができ、RC構造よりはPC構造あるいはPRC構造の方が超高強度化を有効に利用できる。

(2) 破壊曲げモーメントについて

破壊曲げモーメントの計算値 (M_{ud}) は、コンクリートの圧縮応力度の分布を矩形の等価ブロックと仮定して、土木学会示方書によって計算した。なお、コンクリートおよび鋼材の特性値は実測値を用いた。コンクリート強度が $545 \sim 1770 \text{ kgf/cm}^2$ を用いたはりの M_u/M_{ud} は、曲げ引張破壊設計であるRC構造で $0.89 \sim 1.09$ 、曲げ圧縮破壊設計であるPCおよびPRC構造で $1.01 \sim 1.18$ であ

表-3 PCはりの曲げ疲労試験体

試験体 記号	コンクリート			緊張材	はり下縁 の有効 プレスト 計算値 [kgf/cm]
	$\frac{W}{(C+AD)}$ [%]	シリカフューム 混入率 [%]	養生方法	SWPR 1×7 φ15.2mm 本数	
PC14P04F	21.0	20	1次+2次蒸気	4	184.5
PC14P06F	21.0	20	1次+2次蒸気	6	286.3

表-4 荷重条件

	Mupper	Mlower
step 1	はり下縁のコンクリート応力度 [σ_c] が $\sigma_c = -50 \text{ [kgf/cm}^2]$ となるときモーメント	$(0.5fc' \sqrt[2]{3} + \sigma_{ce}) \times W_e$
step 2	はり下縁のコンクリート応力度 [σ_c] が $\sigma_c = -100 \text{ [kgf/cm}^2]$ となるときモーメント	
step 3	はり上縁のコンクリート応力度が $\epsilon_c' = 1200 \mu$ となるときモーメント	
step 4	はり上縁のコンクリートひずみが $\epsilon_c' = 2000 \mu$ となるときモーメント	

表-5 載荷ステップ

荷重ステップ	step 1	step 2	step 3	step 4	
荷重速度 [Hz]	2	2	1~2	0.8~1	
PC14P04F	Mupper	3.27	4.04	6.07	7.07
	Mlower	1.62	1.62	1.62	1.62
PC14P06F	累積回数N	1~100万	100万~200万	200万~300万	300万~破壊
	Mupper	—	5.90	—	9.33
	Mlower	—	2.45	—	2.45
累積回数N	—	1~100万	—	100万~破壊	

表-6 はりの静的曲げ試験結果一覧

Sir.	試験体 記号	圧縮強度 f_c' [kgf/cm ²]	ρ pb	Mcrd [tf·m]	Ma [tf·m]	Mu [tf·m]	Mud [tf·m]	靱性率 μ	$\frac{Ma}{Mu}$	$\frac{Mu}{Mud}$
RC	R05S35	545	0.43	—	11.10	18.90	18.89	3.91	0.59	1.00
	R08S35	885	0.38	—	11.96	27.30	28.58	2.88	0.44	0.96
	R08S50	904	0.35	—	8.32	24.29	23.78	3.91	0.34	1.02
	R11S50	1091	0.42	—	10.53	30.98	35.00	2.77	0.34	0.89
	R11S70	1108	0.43	—	8.13	34.22	33.33	2.02	0.24	1.03
	R14S70	1230	0.57	—	11.70	44.61	48.39	2.26	0.26	0.92
	R14S95	1628	0.69	—	9.23	57.79	53.15	1.05	0.16	1.09
	R17S95	1703	0.90	—	11.25	74.15	76.24	—	0.15	0.97
PC	PC08P03	814	1.38	9.52	9.14	20.16	17.95	1.81	0.45	1.12
	PC11P05	1237	1.48	12.56	16.28	32.08	29.16	1.48	0.51	1.10
	PC14P07	1447	1.67	15.31	22.04	40.97	39.02	1.23	0.54	1.05
	PC17P09	1770	1.71	18.17	27.80	49.79	49.40	1.41	0.56	1.01
PRC	PR08P03	623	2.49	8.57	11.79	29.80	25.17	2.30	0.40	1.18
	PR11P05	1327	1.61	13.13	16.28	42.65	40.27	1.35	0.38	1.06
	PR14P07	1108	2.60	13.71	19.86	49.75	44.58	1.38	0.40	1.12
	PR17P09	1580	1.77	18.56	21.50	60.83	56.29	1.25	0.35	1.08
	PR14P07R	1382	2.21	16.46	19.83	51.15	46.71	2.05	0.39	1.10

った。鉄筋を2段配置したRC構造でMu/Mudが1を下回った理由の一つとして、設計上の鉄筋位置を鉄筋配置の重心とした影響も考えられる。一方、1段配置のはりは、1.00~1.09と安全側であり従来の設計方法ではほぼ推定できると思われる。しかし、PCおよびPRCシリーズのように曲げ圧縮破壊の場合は、高強度になるにしたがってMu/Mud比は1.0に近づくように減少し、また、安全側の設計値は得られるが誤差が大きくなる傾向がある。これらのことから、超高強度コンクリートを用いた部材の曲げ耐力評価は、従来の方法ではほぼ推定できるが、等価応力ブロックの係数・形状についてより慎重な検討が必要である。

(3) 靱性およびたわみについて

図-2はRCはり、図-3はPC、PRCはりのモーメントとはり中央点のたわみの関係を示す。設計上曲げ引張

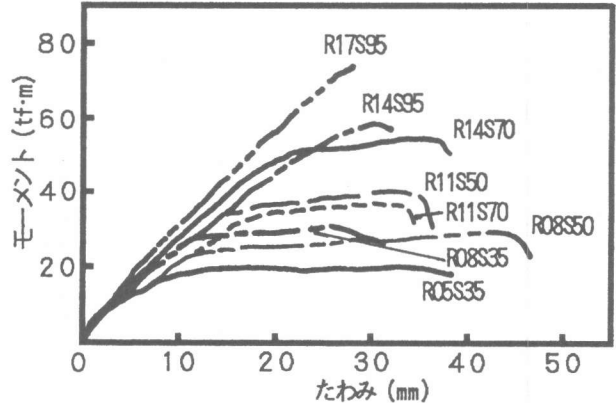


図-2 RCはりのモーメント～たわみ曲線

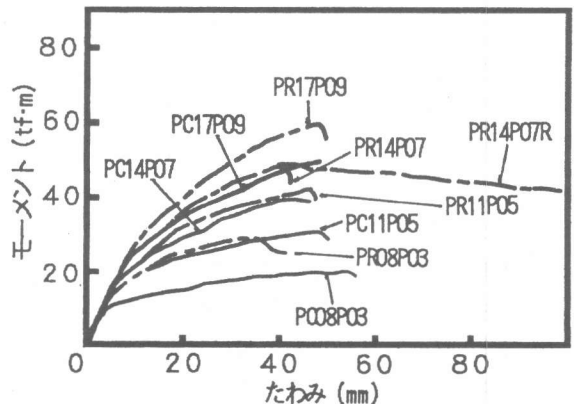


図-3 PC・PRCはりのモーメント～たわみ曲線

破壊を起こすRCはりのたわみは、ひび割れ発生から鋼材の降伏点付近までほぼ直線的である。コンクリートおよび鋼材強度が比較的低い試験体は、鉄筋が降伏するとともにたわみのみが大きく増加し、降伏点たわみの3～4倍まで変形が進行して破壊に至り、非常に靱性に富む性能を示す。一方、設計上曲げ圧縮破壊を起こすPCおよびPRCはりは、図-3に示すようにひび割れ発生までほぼ弾性的で、ひび割れ発生後は曲げ剛性が徐々に低下しながらも抵抗モーメントは増大し、最大モーメントに到達直後にコンクリートの圧縮破壊によってはりが破壊して、耐荷力が急速に低下する。これは、曲げ区間内にはコンクリートを拘束するスターラップを用いなかったことによる。しかし、等曲げ区間に横拘束筋を配置して靱性改善を行った試験体（PR14P07R）は、最大モーメント発生後にかぶりコンクリートは剥離するが、拘束筋内のコンクリートが依然圧縮力を保持するために耐荷力の低下が少なく、その破壊形態は緩やかとなった。靱性率（ μ ）で評価すると、同一配筋で横拘束筋の無いはり（PR14P07）の μ は、1.38であるのに対し、横拘束筋を用いた場合の μ は2.05で約50%増加した。コンクリートが高強度になると部材の破壊状況が脆性的になるため、靱性を確保するために横拘束筋の配置は有効である。

3.2 PCはりの曲げ疲労試験

疲労試験結果を表-7に示す。両試験体とも、はり圧縮縁の初期ひずみが2000 μ となる上限荷重による繰返しステップ（step4）を载荷中に、コンクリートの圧縮域の疲労破壊によってPCはりの破壊が生じた。step4での繰返し回数 N' はPC14P04Fで約621000回（累計362万回）、PC14P06Fで約1057000回（累計206万回）であった。

(1) 曲げ剛性について

図-4にモーメントと中央点たわみ履歴曲線を示す。ひび割れ発生以前のstep1およびstep2の残留たわみは1mmで弾性体として扱える。step3ではひび割れ発生とともにはりの曲げ剛性はやや低下するが、累計300万回での繰返しによる影響は非常に少ない。step4初期のたわみはそれぞれ15mm、10mmであるが、繰返しとともに曲げ剛性が低下し、破壊近傍で34mm、26mmと急増した。両試験体ともPC鋼材の有効応力は0.47 σ_{pu} であるが、PC鋼材とシリカフェームコンクリートとの付着に対する繰返し载荷の影響は全く見られなかった。緊張材本数が多く、プレストレス量が多いPC14P06F試験体は、ひび割れモーメントが大きく、また、曲げ剛性が大きいのでたわみ量が少なく、繰返し曲げにも問題が少ないことから、超高強度コンクリートに高いプレストレスを導入することが有効である。

(2) 疲労強度について

PCはりは、ひび割れ発生以前の状態（step1およびstep2）では、荷重履歴によるたわみおよびひずみの変化は小さかった。上限荷重が増加してひび割れが発生すると、荷重履歴によるたわみ、ひずみ、ひび割れ幅の増加が大きくなりコンクリートの圧縮疲労破壊によりはりが破壊し

表-7 曲げ疲労試験結果一覧

試験体 記号	圧縮強度 f'_c [kgf/cm ²]	Mcrd [tf·m]	Mud [tf·m]	step4の荷重条件		疲労破壊 時ひずみ ϵ'_c [μ]	累積 繰返し回数 N [回]	step4 繰返し回数 N' [回]
				Mupper [tf·m]	Mlower [tf·m]			
PC14P04F	1210	2.58	9.70	7.07	1.62	3594	3621431	621431
PC14P06F	1363	4.04	13.79	9.33	2.45	3019	2057720	1057720

た。本実験による100万回の疲労寿命がstep 1～3までの累積損傷を考慮しながらstep 4であるとした場合、その圧縮疲労限界は実強度を用いた破壊曲げモーメントの計算値のそれぞれ73%および68%となる。西林・井上のRCはり ($f_c' = 501 \sim 594 \text{ kgf/cm}^2$) の圧縮疲労強度と疲労寿命との関係 [1] [2] に照らし合わせると、本実験の結果も同様の傾向がみられる。したがって、シリカフェームを用いた超高強度コンクリートPCはりの曲げ圧縮による疲労性状は、普通強度レベルの曲げ部材とほぼ同じような疲労寿命を有していると考えられる。しかし、一軸圧縮を受ける超高強度コンクリートの疲労特性とともにデータ数がまだ不足しているのが現状であり、これからのデータの蓄積が必要である。

4. まとめ

本実験の範囲内でつぎのことがいえる。

①超高強度コンクリートとプレストレスを組み合わせることで、使用限界状態での抵抗モーメントを増加させることができる。

②破壊曲げモーメントは従来の計算式でほぼ推定できるが、曲げ圧縮破壊をする場合は高強度になるにしたがって M_u/M_{ud} 比は減少する傾向を示す。

③スターラップなどの横拘束筋が無いはりでは、高強度になるほど破壊は脆性的になるが、横拘束筋を密に配置することによって曲げ靱性を確保することができる。

④圧縮縁ひずみ 2000μ を上限荷重とする圧縮破壊型PCはりの曲げ疲労試験を行った結果、 $f_c' = 1200 \text{ kgf/cm}^2$ のはりでは約60万回、 $f_c' = 1350 \text{ kgf/cm}^2$ のはりでは約106万回の繰返して圧縮疲労破壊した。

⑤1200, 1350 kgf/cm^2 の超高強度シリカフェームコンクリートを用いたPCはりの100万回の繰返し載荷による曲げ圧縮疲労強度は、実強度を用いた破壊曲げモーメントの計算値の70%程度であると考えられる。

参考文献

- 1) 岸谷孝一・西澤紀昭：疲労、技報堂出版、pp.67-70、1987.9
- 2) 井上正一・西林新蔵：RCはりの曲げ疲労特性について、土木学会第36回年次学術講演概要集、1974

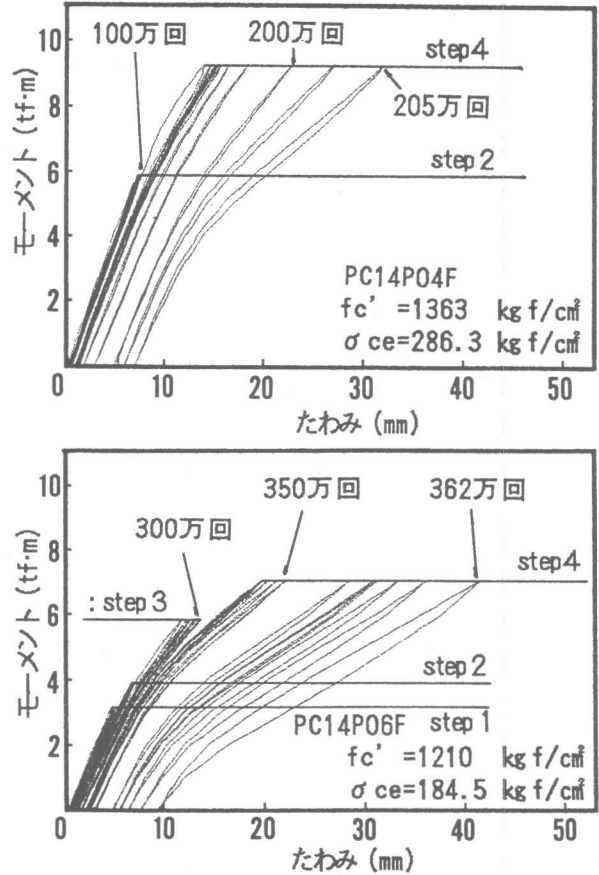


図-4 モーメント～たわみ履歴曲線