

## 論文

## [1083] シリカフェームを用いた超高強度コンクリートの実用化に関する研究

正会員 丸山武彦 (日本コンクリート工業)

正会員○伊東幸雄 (日本コンクリート工業)

正会員 土田伸治 (日本コンクリート工業)

西山啓伸 (日本コンクリート工業)

## 1. はじめに

シリカフェームをコンクリートに混和すると、圧縮強度および耐久性などを改善できることが確認されている。海外では主としてコンクリートの耐久性面で実用化されており、国内では300～1200kgf/cm<sup>2</sup>程度を目標とした研究が行われているが、使用実績およびコンクリート部材に関する報告は多くないのが現状である。筆者らも超高強度化に関して検討した結果、圧縮強度で1800kgf/cm<sup>2</sup>以上の超高強度が得られたことやこれらの物性についても報告した[1]。本報告はシリカフェーム混入超高強度コンクリートの実用化を目的に行ったものであり、高強度の利用によって部材の高強度化、高性能化、小型軽量化、経済性などの多くの面で利点が考えられるからである。シリーズIでは、超高強度コンクリートの破壊ひずみの確認を行うために、円柱供試体による一軸圧縮試験および模型供試体による曲げ試験を行った。シリーズIIでは、ポンプ打設による工場製品製造ラインを使用して、圧縮強度が500kgf/cm<sup>2</sup>～1500kgf/cm<sup>2</sup>の実物PCポールおよびPCパイルの製作と曲げ試験を行い、特に1200kgf/cm<sup>2</sup>～1500kgf/cm<sup>2</sup>の超高強度コンクリートの実用化の確認、曲げ性能の計算値との整合性、PCパイルについては高軸力下における曲げ性能についても検討を行った。

表1 使用材料と主な性質

使用材料	主な性質
セメント	普通ポルトランドセメント、比重 3.16、ブレン値 3,200cm <sup>2</sup> /g
シリカフェーム	ノルウェー産、比重 2.20、比表面積 200,000cm <sup>2</sup> /g
細骨材	内部川産川砂(粗砂)、比重 2.58、粗粒率 2.98
	内部川産玉石砕砂(細砂)、比重 2.60、粗粒率 2.50
粗骨材	内部川産玉石砕石、比重 2.68、最大寸法 15mm
混和材	ナフタリン系高性能減水剤、比重 1.20

## 2. 実験概要

## 2.1 使用材料および配合

使用した材料の物理的性質を表1にコンクリートの配合を表2に示す。シリーズIでは強度レベルの違いによるNo.2～No.4の配合を、シリーズIIでは4種類の配合を使用した。なお、シリカフェームはセメントの外割とした。

## 2.2 試験体

シリーズIの供試体は、一軸圧縮ひずみ測定用としてφ10×20cmの円柱供

表2 コンクリートの配合

配合No	目標強度レベル (kgf/cm <sup>2</sup> )	スラブ (cm)	空気量 (%)	水比 W/C (%)	単位体積重量 C <sub>3</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材率 s/a (%)	シリカフェーム混入率 (%)	高性能材添加率 (%)
1	500	12±2	2±1	41.7	420	43.0	—	0.75
2	850	〃	〃	33.9	440	44.0	—	1.50
3	1,200	〃	〃	27.6	500	42.0	20.0	3.00
4	1,500	〃	3±1	24.6	500	42.0	30.0	5.00

試体およびφ20×30cmの遠心供試体、曲げ圧縮ひずみ測定用にφ20×200cm、厚さ4cmの遠心供試体(以下、曲げ供試体)である。この曲げ供試体の破壊形式は、コンクリートの圧縮破壊となるようにした。シリーズIIの曲げ試験に用いたPCポールの実物大試験体寸法は図1に示すようであり、使用したコンクリートは表3に示すように設計基準強度850kgf/cm<sup>2</sup>と1200kgf/cm<sup>2</sup>の2種類とした。850kgf/cm<sup>2</sup>の高強度PCポールはすでに製品化されているものであり、ポールの破壊荷重を同一として1200kgf/cm<sup>2</sup>の超高強度コンクリートを用いて設計した場合、ポールの鉄筋

量は約30%減少でき経済効果が期待できる。パイル試験体は図2に示すように外径40cmのPCパイルC種の配筋を基準とし、コンクリート強度は500~1500kgf/cm<sup>2</sup>の4種類を使用した。1500kgf/cm<sup>2</sup>のパイル試験体については横拘束筋の効果調べるために、丸鋼φ5の巻き付けピッチを5cm、10cmとした配筋についても試験を行った。

2.3 試験体製作および養生方法

シリーズIの試験体の製作は実験室で行い、シリーズIIのポールおよびパイル試験体は工場で行った。シリーズIでは0.1m<sup>3</sup>、シリーズIIでは1m<sup>3</sup>の強制練りミキサを用いて、セメント、シリカフューム、細・粗骨材を投入して空練りを1分間行い、水および減水剤を投入してから配合No.1,2は1分間、配合No.3,4は3分間の練り混ぜを行った。ポールおよびパイル型枠へのコンクリート注入は工場のポンプを使用し所定の遠心力締固めを行った。シリーズI、IIの全ての試験体は締固め終了後、最高温度65℃で4時間の蒸気養生を行った。脱型後、配合No.1は曲げ試験まで気中放置を行い、配

合No.2,3,4は最高温度180℃で3時間のオートクレーブ養生を行ってから試験まで気中においた。

2.4 実験方法

一軸圧縮ひずみの測定はJIS原案「コンクリートの静弾性係数試験方法(案)」に準じて行い曲げ圧縮ひずみの測定は図3のような曲げ載荷とした。ひずみの測定には60mmワイヤーストレインゲージを用い、貼り付け位置は供試体円周の2等分点(円柱供試体)または4等分点(遠心供試体)における供試体軸に平行、かつ対称な線上で供試体高さの1/2の位置を中心とした。曲げ圧縮供試体のストレインゲージ位置を図3に示す。ポール試験体の曲げ試験方法は図4に示すようにJIS A 5309に準ずる片持梁形式とし、たわみ支持点付近のコンクリート表面と鋼材のひずみ、ひび割れ幅などの測定を行った。パイル試験体は図2に示すような一方向静曲げ試験とし、ポールと同様の測定を行った。荷重は1サイクル目でひび割れ発生まで載荷し、2サイクル目で計算破壊荷重の95%まで載荷して、以後1サイクルにつき10mmの漸増変位繰り返し載荷とした。軸力の導入は、パイルの中空部にPCストランドを挿入して行った。

3. 実験結果

3.1 破壊ひずみ(シリーズI)

実圧縮強度約700~1800kgf/cm<sup>2</sup>の一軸圧縮および

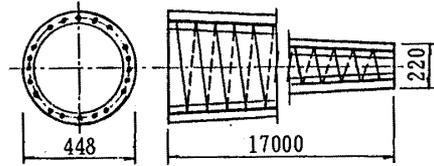


図1 ポール試験体寸法 (mm)

表3 試験体種類

設計強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	試験体
500	PCパイル
850	PCパイル、PCポール
1,200	PCパイル、PCポール
1,500	PCパイル

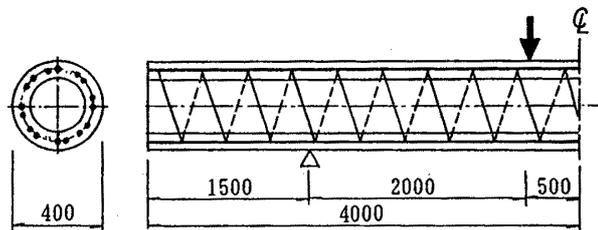


図2 パイル試験体寸法・曲げ試験方法 (mm)

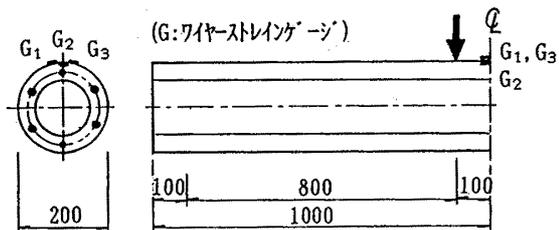


図3 曲げ圧縮ひずみの測定方法

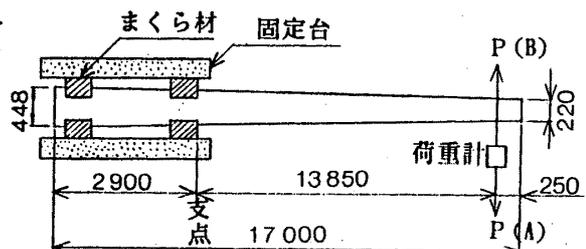


図4 ポール曲げ試験方法 (mm)

曲げ圧縮の破壊ひずみの測定結果を表4、図5に示す。シリカフェームを混入した超高強度コンクリート（配合No.3, No.4）の破壊ひずみは圧縮強度が高くなるにしたがって増大し、工場製品として使用中の高強度コンクリート（配合No.2）に比較すると大きな値を示している。たとえば、遠心1400kgf/cm<sup>2</sup>のシリカフェームコンクリートの破壊ひずみは一軸圧縮では3490μで約30%、曲げ圧縮では4500μで約25%大きく、

シリカフェームの利用によってベースト強度はもちろん、骨材との付着力も極めて増大していることが推測される。また超高強度コンクリートでは、円柱供試体の一軸圧縮ひずみは遠心供試体の場合より大きくなって逆転し、圧縮強度も同様な傾向を示した。この理由は、シリカフェームを多量に混入したコンクリートは遠心力締固めで分離して全量が有効にはならないこと、円柱供試体（振動締固め）の方が全細孔容積が小さくなること[1]供試体の寸法形状が異なることなどが影響しているものと思われる。実物大ポールおよびパイルの計算に用いるコンクリートの圧縮破壊ひずみは、この実験結果を参考しながら実験数が少ないことやバラツキが大きいことなどを考慮して、配合No.2は3000μ No.3およびNo.4は4000μと小さめの値を用いた。

3. 2 実験結果（シリーズII）

3. 2. 1 フレッシュコンクリートについて

配合No.3, No.4は、シリカフェームを多量に混入しているうえに高性能減水材の添加率が高いため粘性が高くワーカビリティはあまり良くないコンクリートであった。コンクリートの圧送には口径 3.5インチの圧送管を取り付けたピストン式のポンプを使用した。配合No.3はシリカフェーム無混入のコンクリートとほぼ同程度の圧送性能であったが、配合No.4は特に粘性が高いために圧送圧力が相当高くなった。また、シリカフェームを混入したコンクリートは、遠心力締固めによるスラリーがほとんど発生しなかった。これは、シリカフェームの主成分であるシリカが非晶質の超微粉であるために、水和の初期に水酸化カルシウム溶液と速やかに反応してゲル状となり水の分離（移動）を妨げること、シリカフェームが球形であることにより単位水量が少なくなっていることなどの影響によるものと思われる。

3. 2. 2 ポール曲げ試験について

(1) 静曲げ試験結果

ポール試験体に用いたコンクリートの圧縮強度を表5に、曲げ試験の結果を表6に示す。PCポールには、超高強度シリカフェームコンクリート(1200kgf/cm<sup>2</sup>)と現行の高強度コンクリート(850kgf/cm<sup>2</sup>)を使用した。ひび割れ荷重の実験値と計算値の比は1.00~1.32で良く一致しており、破壊荷重の場合は0.94~1.04の範囲でこれも良く一致している。したがって、超高強度コンクリートを利

表4 コンクリートの破壊ひずみ

配合 No.	供試体種類	圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	破壊ひずみ (×10 <sup>-6</sup> )		弾性係数 (kgf/cm <sup>2</sup> )
			一軸圧縮	曲げ圧縮	
2	円柱	680	2,448	—	347,000
	遠心	940	2,609	3,627	410,000
3	円柱	1,444	3,671	—	434,000
	遠心	1,410	3,491	4,505	412,000
4	円柱	1,812	4,101	—	447,000
	遠心	1,724	3,775	4,735	437,000

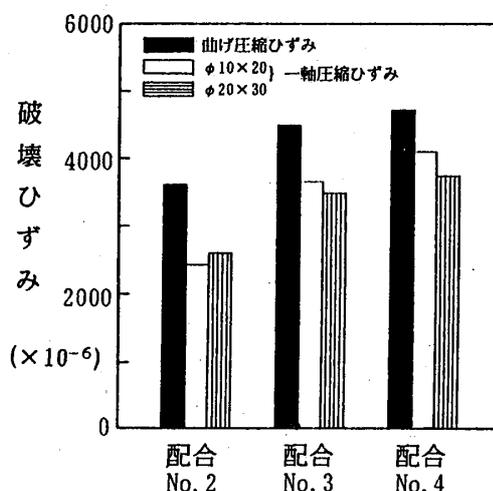


図5 コンクリートの破壊ひずみ

表5 コンクリート強度一覧表

配合 No.	ポール記号	パイル記号	圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kgf/cm <sup>2</sup> )
1	—	N5	515	352,000
2	H	H 8.5	901	401,000
3	U	U 1 2	1,284	441,000
4	—	U 1 5	1,561	440,000

用した場合でも破壊ひずみの設定が適切であれば計算値と良く合うことが確認された。

(2) たわみ

加力点におけるたわみの代表例を包絡線で図6に示す。H2およびU2試験体ともに、ひび割れ前のたわみはほぼ同傾向で増加しており、ひび割れ後

は超高強度コンクリートU2のほうが大きい。これは、1200kgf/cm<sup>2</sup>のコンクリートを使用することによって鉄筋量を約30%減少しているため曲げ剛性が低下しているからである。ひび割れ後のたわみの計算値(土木学会式)と実験値は荷重2tf前後まで良く一致しているが、高荷重になるにしたがって徐々に乖離している。これは、ボールのたわみが大きいことから考えると計算式の適用範囲を外れているのではないかと思われる。なお、たわみの計算に用いた形状はテーパのない3セクションの変断面中空円筒部材複合体とし、ひび割れは全セクション同時に発生するものと仮定した。

(3) 圧縮ひずみ、鋼材の引張りひずみ

コンクリートの圧縮ひずみは図7に示すように、H2、U2共に全荷重域でほぼ同様の傾向で増加している。ひずみの実験値と計算値はひび割れ前は良く一致しており、ひび割れ後はひずみが1500μ以上になると徐々に乖離している。破壊時圧縮ひずみは超高強度コンクリートU2が3600μ、高強度コンクリートH2が2800μであり超高強度コンクリートを用いたほうが大きいことが分かる。しかし、シリーズIの供試体実験での曲げ圧縮破壊ひずみは、それぞれ約4500μおよび約3600μであり、実物大試験体のほうが小さい値となった。これは、曲げ試験時に圧縮側コンクリートの表面が剥離する現象を示したことから、破壊ひずみの測定が不可能になったものと考えられる。さらに、図7に示すU2ボール内PC鋼材の最大圧縮ひずみが4190μ得られていることを考慮すると、両者コンクリートの破壊ひずみは実測値よりさらに大きいものと思う。PCボールの、引張り側PC鋼材のひずみを図8に示す。ひび割れ発生前後とも計算値と実

表6 ポール試験体曲げ試験結果

記号	コンクリート設計強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	ひび割れ荷重 (kgf)			破壊荷重 (kgf)		
		計算値 P <sub>crd</sub>	実験値 P <sub>cr</sub>	P <sub>cr</sub> /P <sub>crd</sub>	計算値 P <sub>ud</sub>	実験値 P <sub>u</sub>	P <sub>u</sub> /P <sub>ud</sub>
H1	850	706	707	1.00	3,244	3,264	1.01
H2		706	792	1.12	3,244	3,150	0.97
U1		786	795	1.01	3,457	3,444	1.00
U2	1,200	786	811	1.03	3,457	3,599	1.04
U3		736	765	1.04	3,255	3,055	0.94
U4		796	1,052	1.32	3,483	3,518	1.01

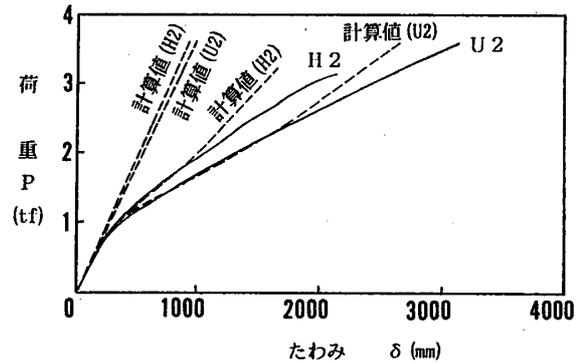


図6 荷重～たわみ図

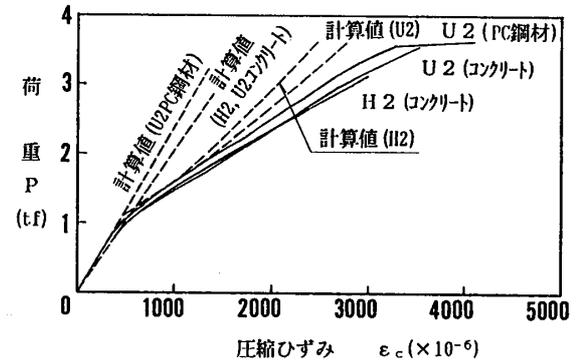


図7 荷重～圧縮ひずみ図

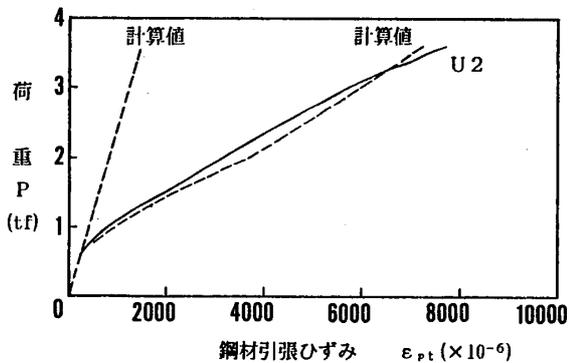


図8 荷重～鋼材引張りひずみ図

験値はほぼ一致している。破壊時のPC鋼材の引張りひずみは7750 $\mu$ であり、有効プレストレス量の3250 $\mu$ を加えると11,000 $\mu$ となりPC鋼材は降伏域に達している。これより、1200kgf/cm<sup>2</sup>のコンクリートを用いたポール試験体は現行の850kgf/cm<sup>2</sup>のコンクリートの場合よりも軸方向筋を31%減少させているにもかかわらず、PC鋼材が切断すること無く破壊に至る設計ができることが確認された。

3. 2. 3 パイル曲げ試験について

(1) 曲げ試験結果

コンクリートの圧縮強度を表5に、曲げ試験結果を表7に、軸力の有る場合を表8に示す。軸力の有無に関係なく破壊曲げモーメントの実験値と計算値の

表7 パイル試験体曲げ試験結果一覧表

記号	強度	拘束筋ピッチ	ひび割れモーメント			破壊モーメント			最大たわみ (mm)	圧縮ひずみ ( $\times 10^{-6}$ )	吸収エネルギー量 (tf $\cdot$ mm)
			計算 (tf $\cdot$ m)	実験 (tf $\cdot$ m)	実験計算 (tf $\cdot$ m)	計算 (tf $\cdot$ m)	実験 (tf $\cdot$ m)	実験計算 (tf $\cdot$ m)			
N5	—	—	8.9	11.4	1.28	18.9	18.2	0.96	35.0	2,198	485
H85	—	—	9.2	12.0	1.30	22.5	23.9	1.06	57.5	2,840	1,057
U12	—	—	10.6	11.8	1.11	25.6	26.0	1.02	67.3	3,554	1,334
U15	—	—	—	13.2	1.19	—	26.4	1.02	72.9	3,919	1,493
	—	P10	11.1	11.4	1.03	25.9	26.9	1.04	82.4	3,243	1,774
	—	P5	—	11.4	1.03		27.5	1.06	118.5	3,260	2,693

比は0.96~1.06で良く一致しており、超高強度コンクリートを用いた場合も従来の計算方法により耐力の推定が可能である。軸力が有る場合と無い場合で破壊曲げモーメントの実験値の比を検討すると、コンクリート強度が500, 850, 1200, 1500kgf/cm<sup>2</sup>においてそれぞれ0.74, 1.23, 1.67, 1.87倍となり、コンクリート強度が高くなると軸力~曲げモーメントの関係は図9のようになり耐荷力は著しく増大する。

(2) たわみ

パイル中央部のたわみの包絡線を軸力無しの場合を図10、軸力有りの場合を図11に示す。たわみの最大値は、軸力の有無に関係なくコンクリート強度が高くなるほど大きく、横拘束を行ったものは拘束筋量が多くなるほど大きくなる。吸収エネルギー量も同傾向で増加しており、普通コンクリート (500kgf/cm<sup>2</sup>) を用いたものに比較して軸力無しの場合、コンクリート強度850kgf/cm<sup>2</sup>で2.2倍、

表8 軸力曲げ試験結果一覧表

記号	計画軸力 (tf)	導入軸力 (tf)	破壊モーメント (tf $\cdot$ m)		
			実験	計算	実験計算
N5	200	213	13.5	13.2	1.02
H85	240	256	29.4	29.3	1.00
U12	240	220	43.5	43.4	1.00
U15	240	258	49.4	48.7	1.01

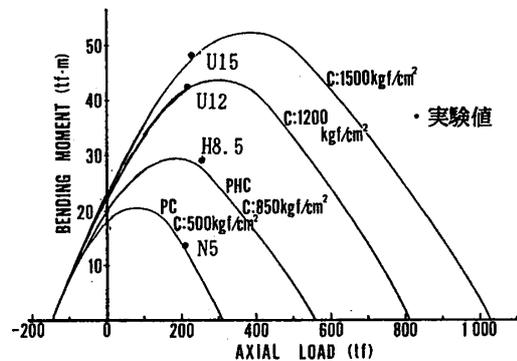


図9 Interaction Curve

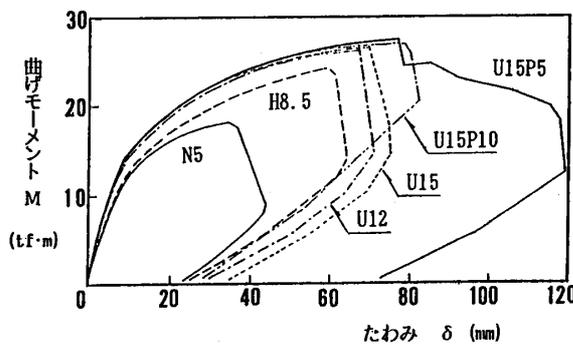


図10 曲げモーメント~たわみ図(軸力無)

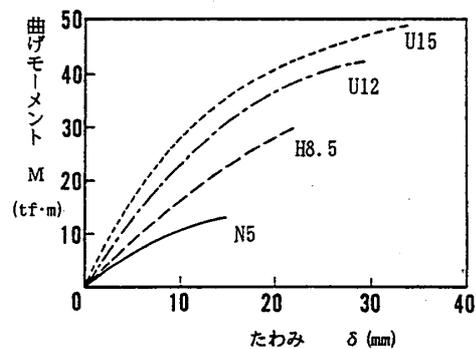


図11 曲げモーメント~たわみ図(軸力有)

1200kgf/cm<sup>2</sup>で2.8倍、1500kgf/cm<sup>2</sup>においては3.1倍となった。横拘束筋を用いるとその量はさらに増大し、普通強度の場合と比較するとそれぞれ3.7倍、5.4倍となり、同じ強度(1500kgf/cm<sup>2</sup>)でもピッチが10mmで1.2倍、5mmで1.8となった。図11から、軸力が作用した場合はコンクリート強度を高くすることによって、曲げ剛性、耐力、靱性を著しく増大させることが可能であることが分かる。このように、破壊ひずみが大きい超高強度コンクリートを用いること、さらに横拘束筋を組み合わせるにより非常に靱性の高い部材が得られることが確認できた。

### (3) ひずみ(軸力無し)

コンクリート圧縮縁のひずみは図12に示すように、コンクリートの強度が高くなるにしたがって最大ひずみも増大している。強度が500, 850, 1200および1500kgf/cm<sup>2</sup>のコンクリートを用いた供試体の測定可能であったひずみの最大値は、それぞれ2200, 2800, 3600および3900 $\mu$ でありボールの実験値と同程度であった。また、横拘束筋を配置した場合の最大ひずみは3250 $\mu$ 程度で、同じ強度のコンクリートで拘束筋を用いない試験体より小さい値を示した。これらの原因はボール試験体の場合と同様な現象によるものと考えられる。

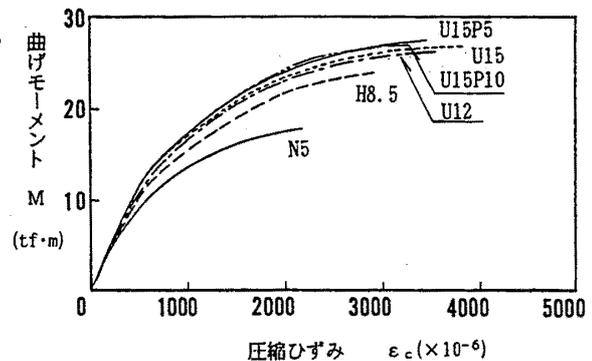


図12 曲げモーメント～ひずみ図(軸力無)

これらの原因はボール試験体の場合と同様な現象によるものと考えられる。

## 4. まとめ

シリカフェームを用いた超高強度コンクリートの圧縮破壊ひずみ(一軸、曲げ)の測定と、二次製品製造ラインにおいてこのコンクリートを用いた、PCボールおよびパイルの実物大試験を行った本実験の範囲で次のことが言える。

(1) シリカフェームを混入することによりコンクリートの粘性は増大するが、混入率が20%程度であれば無混入のものに比較してポンプ圧送性はほぼ同等である。しかし、シリカフェームを30%混入したコンクリートは特に高粘性で圧送圧力は高くなるが、圧送管口径を拡大すれば従来のポンプ注入による二次製品製造ラインで使用は可能である。

(2) 超高強度シリカフェームコンクリートの、一軸圧縮破壊ひずみおよび曲げ圧縮破壊ひずみはシリカフェーム無混入のものに比較して著しく大きくなり、従来強度(850kgf/cm<sup>2</sup>)のコンクリートを使用した薄肉多量配筋で圧縮破壊として設計された高耐力曲げ部材に、このような超高強度コンクリートを使用すると鋼材量を減少することが可能であることが実証できた。

(3) コンクリート強度を500~1500kgf/cm<sup>2</sup>まで変化させたPCパイルの曲げ実験では、コンクリート強度が高くなるほどおよび横拘束筋を配置することによって、曲げ耐力や最大たわみが大きくなり吸収エネルギー量が増大すること、超高強度コンクリートは高軸力の作用状態で曲げ耐力が著しく増大することが確認された。

(4) 超高強度コンクリートを用いた実物大PCボールおよびPCパイルの曲げ破壊耐力の実験値は計算値とほぼ一致しており、従来の計算方法で推定が可能である。

### 参考文献

1) 丸山武彦・土田伸治・河野 清：シリカフェームコンクリートの諸性質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.12、No.1、pp105-110、1990.6