

論文

[1017] 膨張材を混入したシリカフェームコンクリートの特性について

正会員○加藤弘義（徳山曹達株式会社）  
 正会員 高木宣章（立命館大学理工学部）  
 正会員 宮川豊章（京都大学工学部）  
 正会員 藤井 学（京都大学工学部）

1. はじめに

近年、塩害、アルカリ骨材反応などによるコンクリート構造物の早期劣化が大きな問題となっており、耐久性の向上が重要な課題となっている。従来より、ひびわれ劣化対策の1つとしてケミカルプレストレスの導入を目的とした膨張コンクリートが用いられているが、その用い方によっては強度の低下、内部組織の劣化など改善すべき点も多い。超微粉末ボゾラン材料であるシリカフェームは、コンクリートの内部組織の改善効果が高く、コンクリートの緻密化という点から耐久性の向上に役立つと考えられている。

本研究は、シリカフェームと膨張材を併用したコンクリートの特性を検討し、実構造物への適用のための基礎的資料を得ることを目的としている。

2. 実験概要

2.1 実験計画

本研究の実験は、以下に示す2シリーズから構成されている。

シリーズ1：円柱供試体を鉄筋で拘束した拘束コンクリートを用いて、膨張材を混入したシリカフェームコンクリートに導入されるケミカルプレストレス量、圧縮強度をはじめとする基礎的力学特性、細孔構造および透水性について検討する。

表-1 実験条件(シリーズ1)

水結合材比 (%)	55
膨張材量 (kg/m <sup>3</sup> )	0, 30, 60
SF混入率 (%)	0, 10, 20

注) SF：シリカフェーム

シリーズ2：シリーズ1でケミカルプレストレスの導入を確認することのできたコンクリートの配合を用い、シリーズ1とほぼ等しい拘束鉄筋比を有する鉄筋コンクリートはりの曲げ性状を検討する。

表-2 実験条件(シリーズ2)

タイプ	N-0	N-60	SF20-60
膨張材量 (kg/m <sup>3</sup> )	0	60	60
SF混入率 (%)	0	0	20

シリーズ1と2の実験条件を各々表-1、2に示す。

2.2 使用材料およびコンクリートの配合

コンクリートの示方配合を表-3に示す。単位水量は170kg/m<sup>3</sup>、シリカフェームの混入によるスランブの低下は高性能減水剤により調整し、シリカフェーム無混入時のスランブを7.5±1cm、シリカフェーム混入時を12±1cmとした。目標空気量は4±1%とし、AE助剤量により調整した。シリカフェームは市販の粉体(SiO<sub>2</sub>=94.8%、比表面積20m<sup>2</sup>/g、平均粒

表-3 コンクリートの示方配合

タイプ	スランブ <sup>o</sup> (cm)	空気量 (%)	W/(C+SF) (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )						
					W	C	S	G	SF	EP	
N-0	8.2	4.2				309	812	998	--	--	
N-30	7.8	4.3	55	46	170	279	812	998	--	30	
N-60	7.8	4.1				249	811	996	--	60	
SF10-0	11.0	2.9				278	789	1010	31	--	
SF10-30	12.4	3.7	55	45	170	248	789	1010	31	30	
SF10-60	12.9	3.4				218	788	1009	31	60	
SF20-0	12.1	3.9				247	767	1023	62	--	
SF20-30	12.9	3.4	55	44	170	217	766	1021	62	30	
SF20-60	12.0	3.3				187	766	1021	62	60	

注) EP：膨張材

径 $0.15\mu\text{m}$ )をセメント重量に対して内割で使用した。なお、粗骨材の最大寸法は $12\text{mm}$ である。

### 2.3 供試体、養生および実験方法

シリーズ1の円柱供試体を図-1に、シリーズ2の鉄筋コンクリートはり供試体を図-2に示す。円柱供試体( $\phi 15 \times 30\text{cm}$ )は、供試体両端の拘束鉄板を $\phi 22\text{mm}$ の鉄筋(拘束鉄筋比 $2.40\%$ )で緊結することにより拘束を与えた。鉄筋コンクリートはり( $10 \times 20 \times 160\text{cm}$ )には、軸方向鉄筋にD13(降伏点 $3550\text{kgf/cm}^2$ 、引張強さ $5080\text{kgf/cm}^2$ )、スターラップに $\phi 6$ (降伏点 $4950\text{kgf/cm}^2$ 、引張強さ $5600\text{kgf/cm}^2$ )を使用した。

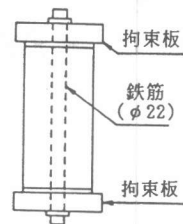


図-1 円柱供試体

はりの軸方向拘束鉄筋比は $2.53\%$ である。

円柱供試体は、打設翌日脱型し1日間恒温恒湿室で密封養生の後、標準水中養生を行った。膨張ひずみは、拘束鉄筋に貼布した2枚

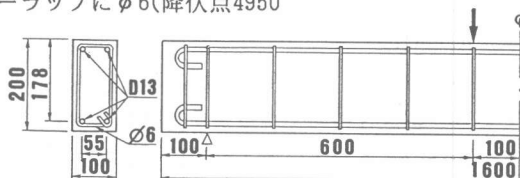


図-2 はり供試体

単位: mm

の電気抵抗線ひずみゲージにより測定した。材令28日に拘束状態で圧縮試験を行い圧縮強度、弾性係数、ポアソン比を求めた。細孔径分布測定用小片は、拘束を解除して無拘束状態とした材令28日の円柱供試体から採取し、アセトン処理し炉乾燥( $60^\circ\text{C}$ )した後、水銀圧入式ポロシメータで圧力制御により細孔径分布を測定した。また、材令28日以降、重量がほぼ一定となるまで恒温恒湿室に静置した供試体( $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ 、拘束鉄筋 $\phi 16\text{mm}$ 、拘束鉄筋比 $2.27\%$ )を用いて、JIS A 6910「複層仕上塗材」を準用した透水試験を行なった。

鉄筋コンクリートはりは、打設翌日脱型し試験時まで散水湿布養生を行った。材令28日で1方向繰返し曲げ載荷試験を行った。試験スパン $140\text{cm}$ 、曲げスパン $20\text{cm}$ 、せん断スパン $60\text{cm}$ 、せん断スパン有効高さ比 $3.4$ の対称2点載荷とし、スパン中央のたわみ、軸方向鉄筋とスターラップのひずみ、曲げひびわれ幅の測定を行った。曲げひびわれの発生を目視で確認した後、最大荷重を $1\text{tf}$ ずつ増加させ、最大荷重と下限荷重 $0.25\text{tf}$ の間を引張鉄筋が降伏するまで繰返し載荷を行い、引張鉄筋降伏後はりを破壊に至らせた。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 シリーズ1 — 拘束コンクリート試験 —

##### 3.1.1 ケミカルプレストレス

ケミカルプレストレス( $\sigma_p$ )は、拘束鉄筋のひずみから次式により算定した。

$$\sigma_p = \varepsilon_s E_s p$$

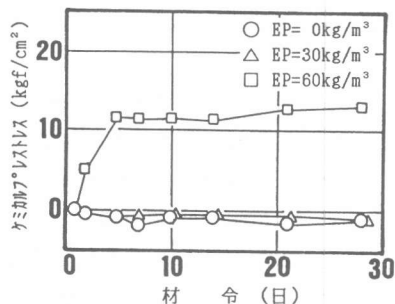
ここで  $\varepsilon_s$ : 拘束鉄筋のひずみ

$E_s$ : 拘束鉄筋の弾性係数 ( $2.1 \times 10^6 \text{kgf/cm}^2$ )

$p$ : 拘束鉄筋比 ( $2.40\%$ )

ケミカルプレストレスへの膨張材量とシリカフューム

混入率の影響を各々図-3、4に示す。シリカフューム混入率に関わらず、膨張材量 $30\text{kg/m}^3$ では収縮補償程度の膨張量であり、ケミカルプレストレスはほとんど導入されていないが、膨張材量 $60\text{kg/m}^3$ では、ケミカルプレストレスの増加が著しい。ケミカルプレストレスの導入は材令2~5日の間に急激に行われ、その後は比較的安定している。また、シリカフュームの混入により



a) シリカフューム混入率 0%

図-3 ケミカルプレストレスへの膨張材量の影響

ケミカルプレストレスの増加が顕著にみられ材令28日における導入量は、シリカフェーム無混入の $13.0\text{kgf/cm}^2$ に対し、混入率20%では $19.0\text{kgf/cm}^2$ と46%増加している。しかし混入率10%の場合、材令28日のケミカルプレストレスは $7.5\text{kgf/cm}^2$ と、無混入の場合より42%減少している。一般にシリカフェームコンクリートは養生条件に敏感で、材令初期において収縮を起こしやすい。本実験においては脱型後1日間密封養生をした後水中養生を行っており、混入率10%の場合では材令初期においてシリカフェームが収縮などの悪影響を及ぼしたものと考えられる。

### 3. 1. 2 強度特性

圧縮強度と膨張材量の関係を図-5に示す。膨張材量 $30\text{kg/m}^3$ では

圧縮強度の減少はほとんどみられないが、 $60\text{kg/m}^3$ ではシリカフェームを10%混入したコンクリートを除き約10%の減少が認められる。圧縮強度とシリカフェーム混入率の関係を図-6に示す。各膨張材量ともシリカフェームの混入により圧縮強度の増加が認められる。また、混入率の増加にともない強度が大きくなっており、混入率10%では膨張材量 $60\text{kg/m}^3$ の場合を除き無混入時より約15%、混入率20%では約25%の増加となっている。したがって、シリカフェームの混入により膨張材の混入による圧縮強度の低下を抑制できるものと考えられる。

初期接線弾性係数と膨張材量の関係を図-7に示す。シリカフェーム無混入の場合、膨張材は弾性係数に影響をほとんど及ぼさないが、シリカフェームを混入すると弾性係数は増加している。また、膨張材無混入の場合、シリカフェームの混入により圧縮強度が増加するにもかかわらず弾性係数に変化は認められないが、膨張材を混入すると1例を除き弾性係数の増加が認められる。

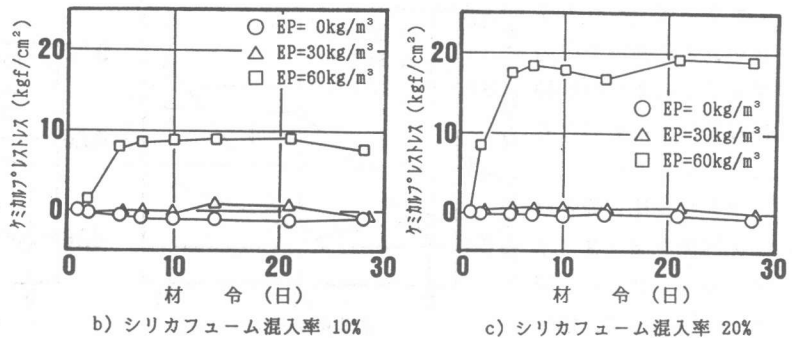


図-3 ケミカルプレストレスへの膨張材量の影響

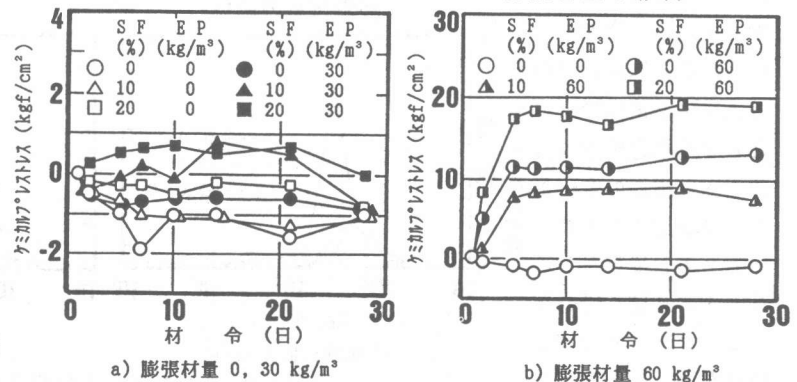


図-4 ケミカルプレストレスへのシリカフェーム混入率の影響

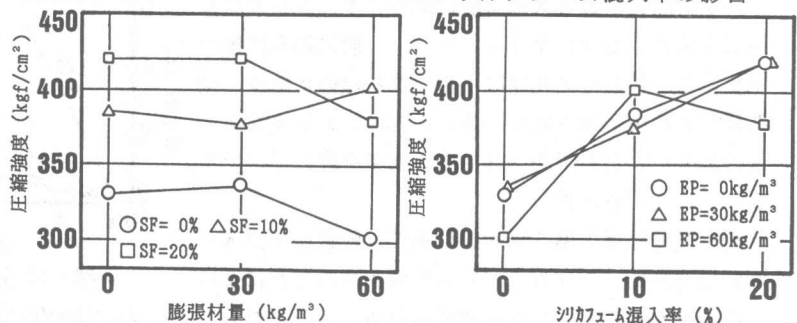


図-5 圧縮強度と膨張材量の関係 図-6 圧縮強度とシリカフェーム混入率の関係

したがって、シリカフェームと膨張材を併用することにより弾性係数は増加するものと考えられる。

ポアソン比と膨張材量の関係を図-8に示す。シリカフェーム混入率に関わらず、膨張材量の増加にともないポアソン比は増加している。これは膨張材の混入による体積膨張にともなう構造破壊も含めた内部構造の変化がポアソン比に表われているものと推察される。

3. 1. 3 細孔径分布  
コンクリートの細孔径分布の一例を図-9

に示す。膨張材の混入の有無に関わらず、シリカフェームを混入したコンクリートでは、一般に細孔容積が減少するとともに細孔径は小さくなる傾向にあり、細孔構造の改善がみられている。これは、シリカフェームの混入による力学的特性の改善効果を裏付けている。

3. 1. 4 透水量

透水試験結果の例を図-10に示す。膨張材を混入しない場合には、シリカフェームを混入することによって透水量が減少することが認められる。これに対し、膨張材を60kg/m<sup>3</sup>混入した場合には、シリカフェームを混入しない場合には透水量が増大するものの、シリカフェームを10%混入することによって透水量を著しく減少させることが可能であった。なお、シリカフェーム混入率20%、膨張材量60kg/m<sup>3</sup>の供試体については、漏水が激しく測定値からは省いた。

3. 2 シリーズ2 — 鉄筋コンクリートはりの曲げ載荷試験 —  
3. 2. 1 ひびわれ性状

鉄筋コンクリートはりの曲げ載荷試験結果を表-4に、荷重～たわみ曲線を図-11に示す。目視観察による曲げひびわれ発生荷重は普通コンクリートはり、膨張コンクリートはりの両者ともほぼ1.5tfで有意な差はみられ

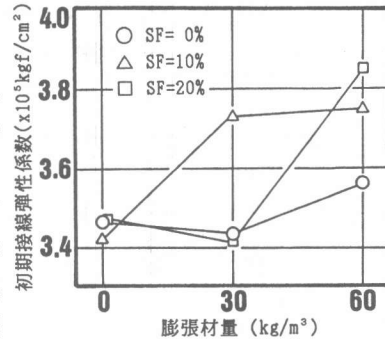


図-7 初期接線弾性係数と膨張材量の関係

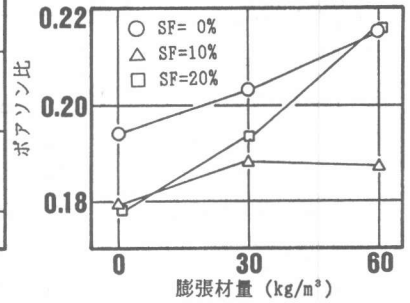
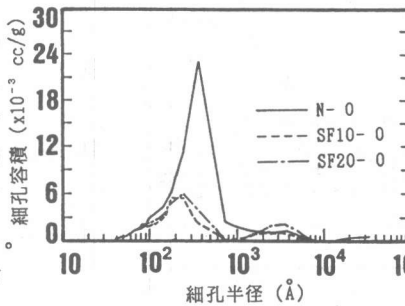
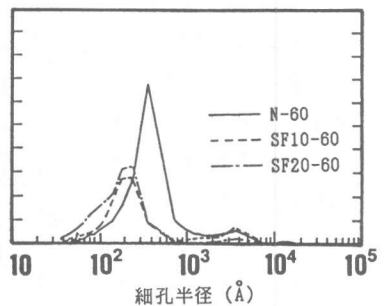


図-8 ポアソン比と膨張材量の関係



a) 膨張材量 0 kg/m<sup>3</sup>



b) 膨張材量 60 kg/m<sup>3</sup>

図-9 コンクリートの細孔径分布

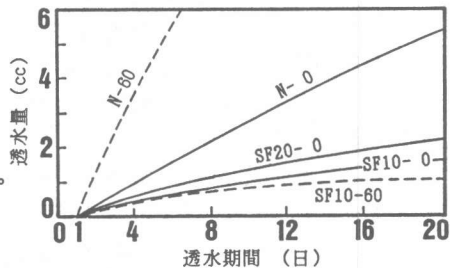


図-10 透水量の経時変化

表-4 曲げ載荷試験結果

タイプ	曲げひびわれ発生荷重(tf)		引張鉄筋降伏荷重 (tf)	最大耐力 (tf)
	目視観察	ひびわれ幅 0.04mm時		
N-0	1.55	1.44	5.13	6.37
N-60	1.51	1.76	5.37	6.34
SF20-60	2.12	2.13	5.38	7.50

ないが、シリカフェームを併用したはりでは2.1tfと前者に比べて増加している。しかし、目視観察による曲げひびわれ発生荷重時の各はりの最大ひびわれ幅には大きなばらつきがある。そこで、一般に目視可能なひびわれ幅の最小値と考えられる0.04mmを曲げひびわれ発生時のひびわれ幅と仮定したときの曲げひびわれ発生荷重を算定した。これによると、曲げひびわれ発生荷重は、普通<膨張<膨張・シリカフェームコンクリートはりの順に増大しており、膨張材の混入による曲げひびわれの発生抑制効果が認められる。そして、この抑制効果はシリカフェームの混入により、さらに高められている。

繰返し载荷の下限荷重0.25tf時における残留曲げひびわれ幅を図-12に示す。普通コンクリートはりに比べて膨張材混入はりでは残留ひびわれ幅が著しく小さくなっており、膨張材の混入によるひびわれ復元性の向上が認められる。しかし、シリカフェームの混入による改善は、みられない。

ひびわれ発生状況を図-13に示す。普通コンクリートはりにおいては、せん断スパンに斜めひびわれが発生している。膨張材混入はりでは、せん断スパンに斜めひびわれの発生はほとんどみられず、曲げひびわれ発生本数は少なく、ひびわれ間隔も小さくなっている。膨張材とシリカフェームを併用したはりでは、曲げひびわれ間隔が膨張材のみを用いた場合よりさらに小さくなっており、シリカフェームの混入により鉄筋とコンクリートの付着性状が改善されていると考えられる。

### 3. 2. 2 ケミカルプレストレスの算出

はり供試体と同一養生条件下の普通コンクリートの曲げ強度および複鉄筋はりの全断面積を有効とした換算断面2次モーメントを利用し

て、ひびわれ幅0.04mmより推定した曲げひびわれ発生モーメントから算出したはり供試体のケミカルプレストレスを表-5に示す。これによると、各はりの曲げ強度を普通コンクリートの曲げ強度と同じと仮定している点に問題はあるものの、はり供試体に導入されているケミカルプレストレスの計算値と円柱供試体により測定したケミカルプレストレスはよく一致している。膨張・シリカフェームコンクリートはりについては計算値の方が大きい値となっているが、コンクリートの曲げ強度が普通コンクリートよりも大きくなっていると考えられるので、実際に導入されているケミカルプレストレスは計算値よりも小さく、円柱供試体により測定したケミカルプレストレスに近い値になると考えられる。

### 3. 2. 3 鉄筋ひずみ

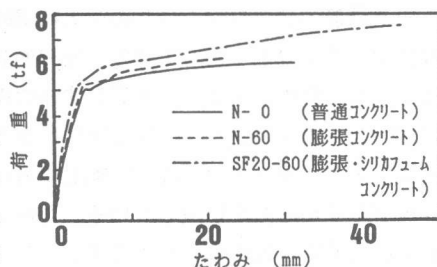


図-11 荷重～たわみ曲線

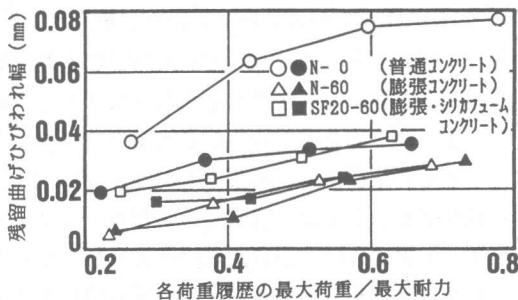


図-12 残留曲げひびわれ幅

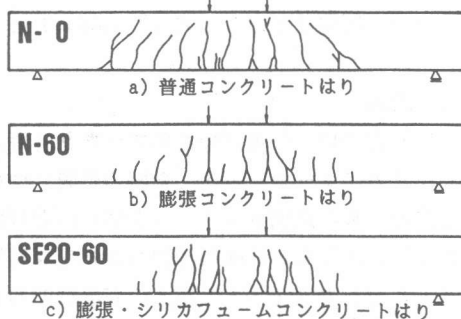


図-13 ひびわれ発生状況

表-5 ケミカルプレストレス

タイプ	N-60	SF20-60
計算値	12.7	25.2
実測値	13.0	19.0

実測値はシリーズ1の値  
単位: kgf/cm<sup>2</sup>

引張鉄筋のひずみは、はりの最大荷重時にすべて降伏時ひずみ以上に達しており、典型的な曲げ破壊を示した。荷重～スターラップひずみ曲線を図-14に示す。普通コンクリートはりでは荷重の増加にともないスターラップひずみが増加しており、スターラップがせん断力を伝達している。しかし、膨張材混入はりでは、低荷重レベルでスターラップひずみの増加はほとんど認められず、最大耐力付近で100～200 $\mu$ のひずみがみられるものの、普通コンクリートはりに比べて著しく小さい。これは、ケミカルプレストレスによってせん断ひびわれが抑制されたため、コンクリートによるせん断力の負担能力が著しく大きくなったことによると考えられる。

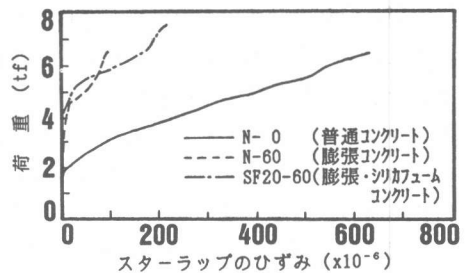


図-14 荷重～スターラップひずみ曲線

### 3. 2. 4 降伏荷重および最大耐力

はりの降伏荷重は、膨張材を60kg/m<sup>3</sup>混入することにより約5%程度増加するものの、ほとんど同様な値を示しており膨張材およびシリカフェウムの混入による影響は少ないようである。

すべてのはりは、引張鉄筋降伏後コンクリートが圧潰し曲げ破壊を示した。普通および膨張コンクリートはりの最大耐力はほぼ同じ値であるが、膨張・シリカフェウムコンクリートはりでは、前者に比べて約20%増加している。これは、ケミカルプレストレスおよびシリカフェウムコンクリートの終局ひずみの増大(約1000 $\mu$ )との相乗効果によるものと推察される。

## 4 結論

本研究では、従来用いられてきたケミカルプレストレスの導入を目的とした膨張コンクリートにシリカフェウムを混入した時の性質について検討した。また、実構造物への適用の基礎的資料を得るために鉄筋コンクリートはりの曲げ載荷試験を行い、その力学的挙動の検討を行った。以下に、本研究の範囲内で得られた主な結果を要約する。

(1) シリカフェウムの混入の有無に関わらず、膨張材量30kg/m<sup>3</sup>程度ではケミカルプレストレスの導入効果はみられず、ケミカルプレストレスの導入には60kg/m<sup>3</sup>程度の膨張材が必要である。その際、シリカフェウムを20%混入することによりケミカルプレストレスの導入効果は著しく向上する。

(2) シリカフェウムの混入により、膨張材の混入による圧縮強度の低下を防止し、さらには増加させることができる。また、シリカフェウムと膨張材を併用することにより弾性係数が増加する傾向にある。

(3) 膨張コンクリートを鉄筋コンクリートはりに適用することにより、曲げひびわれ発生抑制効果が向上する。さらにシリカフェウムを混入することにより、この効果はより一層向上する。

(4) シリカフェウムを混入した膨張コンクリートを鉄筋コンクリートはりに適用することにより最大耐力が増大する。

最後に、本研究の遂行にあたり御協力いただいた(株)鴻池組の小野紘一、松村誠両氏をはじめとする皆様に、深く感謝の意を表します。

(参考文献) (株)鴻池組：ケミカルプレストレスによる高止水性を有するコンクリートの開発、(株)鴻池組技術資料、1989