

# 論文 高強度化軽量繊維補強コンクリートの破壊特性に及ぼす高温加熱の影響

塚本 剛史<sup>\*1</sup>・橘高 義典<sup>\*2</sup>・田村 雅紀<sup>\*3</sup>

**要旨：**本研究は、高強度化軽量繊維補強コンクリートについて、その破壊特性に及ぼす高温加熱の影響を明らかにしたものである。繊維、空気泡等の混入条件を変えた各種調合の高強度化軽量気泡繊維補強コンクリートについて、1時間の加熱試験を行い、楔挿入型割裂試験により荷重開口変位曲線および引張軟化曲線を求め、高温加熱による破壊特性への影響を評価した。結果、空気泡導入、繊維混入には爆裂を軽減する効果があること、ポリビニルアセタール合成繊維（以下、ビニロン繊維）は高温加熱時の溶解によりマトリックス部分への熱負担を抑制する可能性があること等が判明した。  
**キーワード：**高強度化軽量コンクリート、繊維補強、高温加熱、耐火性、破壊特性

## 1. はじめに

天然骨材の枯渇、低品質化等の問題を解消する為、近年では各種廃材の骨材としての利用、あるいはそれらを主原料とした各種人工軽量骨材の開発が盛んに行われている。そして、人工軽量骨材と一定容積の空気泡を高強度ペーストに混入することにより、「高強度・軽量・容積確保」の条件を満たすことのできる高強度化軽量コンクリートは、多くの利点を有する建築材料であると考えられる<sup>1)</sup>。

また、繊維補強により靱性を高めた、高強度化軽量繊維補強コンクリートは、力学特性・運搬作業性能等の建材性能が優れる点が挙げられるが、多量の空気泡及び熱溶解性繊維を含有することにより熱的な性質も優れるものと考えられる。すなわち、空気泡の存在により熱伝導性が低くなること、繊維が熱溶解することにより、マトリックス部分の受熱量を軽減することにより、火災時の高温加熱下において、従来の高強度セメントマトリックスに見られるような爆裂現象が緩和される可能性があることなどである（図-1）。

本研究では、空気量、人工軽量骨材混入量、ビニロン繊維混入の有無等を実験要因としたペーストおよびモルタル試験体を作製し、各試験体について耐火試験を行い、爆裂性状、強度残存率を確認すると同時に、楔挿入型割裂試験により得られた荷重-開口変位曲線から、多直線近似法により引張軟化曲線を求め、耐火試験前後の破壊特性を評価し、空気泡、繊維、人工軽量骨材が及ぼす影響について考察・検討した。

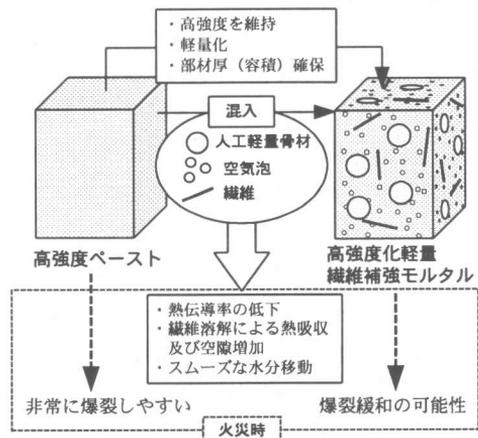


図-1 高強度化軽量繊維補強コンクリート

\*1 積水ハウス株式会社 工修（正会員）

\*2 東京都立大学大学院教授 工学研究科建築学専攻 工博（正会員）

\*3 東京都立大学大学院助手 工学研究科建築学専攻 工修（正会員）

## 2. 耐火性状の評価方法

### 2.1 耐火試験

耐火試験は JIS A 1304 の 1 時間標準加熱曲線 (図-2) に基づいて行った。耐火試験炉寸法は内法 750mm×700mm×800mm とし、加熱は 3 面加熱とする。耐火試験後は耐火試験炉内に 24 時間放置し、除熱した。

### 2.2 強度試験

強度試験は寸法 40mm×40mm×160mm の試験体を用い、圧縮強度試験と曲げ強度試験を行った。耐火試験を行わない試験体と耐火試験を行った試験体それぞれの強度から、式(1)より強度残存率  $R$  を求めた。

$$R = \sigma_h / \sigma \cdot 100 \quad (1)$$

ここに

$R$  : 強度残存率 (%)

$\sigma_h$  : 耐火試験後の強度 (N/mm<sup>2</sup>)

$\sigma$  : 耐火試験前の強度 (N/mm<sup>2</sup>)

### 2.3 楔挿入型割裂試験

破壊靱性試験として、モード I 型 (引張型) の破壊が耐火試験に適する小さな試験体で得られる楔挿入型割裂試験を考案した (図-3)。なお、楔角度は  $\theta = 15^\circ$  とした。試験体寸法は 100mm×100mm×120mm とし、試験体中央にダイヤモンドカッター (刃厚 1mm) により高さの半分 (50mm) までの切欠きを入れた。

破壊に要するエネルギー変化を精度よく把握する為、試験装置として、図-4 のように加力部、制御装置、油圧装置などからなるクローズドループシステム (閉回路機構) を有するサーボ・コントロール式油圧試験機を用いた。また、安定破壊が得られるように、切欠き端部の開口変位 (CMOD) の変位速度を、繊維を混入しない試験体は 0.0005mm/min、繊維を混入する試験体は 0.02mm/min に設定した。なお耐火試験後試験体は、ピニロン繊維の消失と同時に、強度の大幅な低下、脆性の増加の可能性があるため、変位速度を 0.0005mm/min まで低減して測定した。CMOD の計測には、変位制御用の高感度クリップゲージを使用した。

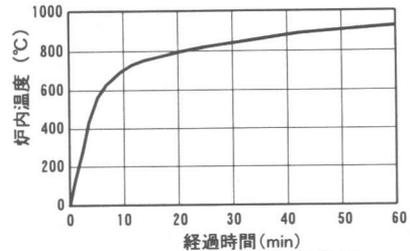


図-2 1時間標準加熱曲線 (JIS A 1304)

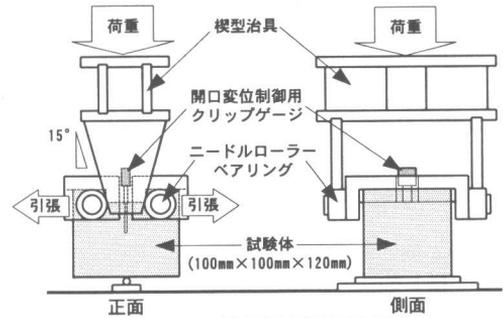


図-3 楔挿入型割裂試験

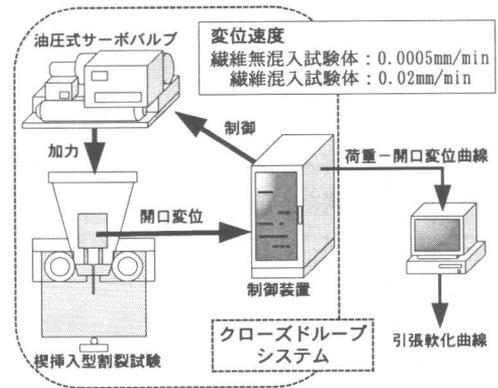


図-4 システムフローチャート

### 2.4 破壊特性の評価

楔挿入型割裂試験により得られる荷重-開口変位曲線を基に、多直線近似法により引張軟化曲線 (結合力モデルにより破壊進展をモデル化した場合での結合力とひび割れ開口変位との関係) を求めた<sup>2)</sup>。まず、結合力モデルと引張軟化構成則を用いた楔挿入型割裂試験での荷重-開口変位曲線での解析プログラムを作成し、実験結果を逆解析することで、多直線型の引張軟化曲線を逐次最適化し求めた。材料の本質的な引張強度評価値となる引張軟化曲線の初期結合応力は、ひび割れの進展に対し、一時的に軟化勾配を 0 と仮定し (完全塑性型)、ひび割れ進

展解析結果と実際の荷重－開口変位曲線とが一致するように求めた。

本研究では、引張軟化曲線における初期エネルギー吸収能を考慮した靱性評価パラメータとして、有効破壊エネルギー  $G_F^U$  により靱性を評価した。ひび割れ進展に要する平均的な消費エネルギーとして、引張軟化曲線で囲まれる部分の面積は、開口変位が限界開口変位  $\delta_{\sigma}$  となるまでに必要なエネルギー、破壊エネルギー  $G_F^{TSD}$  と定義され、靱性の評価指標となる。しかしながら、繊維補強コンクリートでは繊維のブリッジング作用などにより、コンクリートが完全な破断に至らず、限界開口変位  $\delta_{\sigma}$  が特定できない場合もあり、破壊エネルギー  $G_F^{TSD}$  の評価が難しい。そこで、有効ひび割れ幅  $\delta_u$  を設定し、 $\delta_u$  まで引張軟化曲線で囲まれる面積を有効破壊エネルギー  $G_F^U$  とする。 $\delta_u$  は部材の耐久性、防水性、美観の観点から、その機能が大きく低下する値として、 $\delta_u=0.5\text{mm}$  と設定した。

### 3. 試験体概要

#### 3.1 使用材料

使用材料を表-1に示す。セメントは、二次部材への適用を考慮し早強ポルトランドセメントを使用した。細骨材には真珠岩を主原料とする造粒型の人工軽量骨材と、廃ガラス発泡骨材の2種類を使用した。廃ガラス発泡骨材は、再利用を目的として回収されたものの、廃棄処分されることが多い色付のガラスピンなどを原料として発泡している為、地球環境保護の面から利用する価値が十分にある。繊維には、高強度マトリックスでの使用で特に靱性改善効果に優れる、ポリビニールアルコール樹脂を原料とするピニロン繊維（融点 240℃）と、耐火試験により焼失することのない鋼繊維（両端フック付）の2種類を使用した。混和材にはシリカフェーム、混和剤にはポリカルボン酸エーテル系の高性能 AE 減水剤と、アニオン酸系特殊界面活性剤を起泡剤として使用した。

表-1 使用材料

記号	材料	性質
C	セメント	早強ポルトランドセメント 比重 3.16
SL	人工軽量骨材	主原料：真珠岩 24時間吸水率 5.3% 最大径 5mm 絶乾比重 1.05
GL	廃ガラス発泡骨材	24時間吸水率 7.6% 最大径 5mm 絶乾比重 0.70 表面粘土被膜による耐アルカリ性確保
SF	シリカフェーム	SiO <sub>2</sub> 96.8% 比重 2.20
SP	高性能 AE 減水剤	ポリカルボン酸エーテル系 比重 1.0
FA	起泡剤	アニオン酸系特殊界面活性剤 比重 1.0
V-F	ピニロン繊維	繊維長 30mm 繊維径 240×720 μm 引張強度 900MPa 比重 1.30 融点 240℃
S-F	鋼繊維	繊維長 30mm 繊維径 600 μm 引張強度 1078MPa 比重 7.85 両端フック付タイプ

表-2 計画調合

記号*	W/B (%)	質量 (kg/m <sup>3</sup> )								
		W	C	SL	GL	SF	SP	FA	V-F	S-F
P	20	341	1714	0	0	191	47.6	0.0	0	0
P/A	20	332	1714	0	0	191	47.6	9.5	0	0
SL	20	199	840	525	0	95	23.8	0.0	0	0
SL/A	20	194	857	525	0	95	23.8	4.8	0	0
SL/VF	20	195	840	525	0	93	23.3	0.0	13	0
SL/AVF	20	190	840	525	0	93	23.3	4.7	13	0
GL(20)	20	196	857	0	350	95	23.8	0	0	0
GL(30)	30	259	720	0	350	80	8.0	0	0	0
GL/VF(20)	20	193	840	0	350	93	23.3	0	13	0
GL/VF(30)	30	254	706	0	350	78	7.8	0	13	0
GL/SF(20)	20	193	840	0	350	93	23.3	0	0	79
GL/SF(30)	30	254	706	0	350	78	7.8	0	0	79

\*P：ペースト SL：人工軽量骨材 GL：廃ガラス発泡骨材 A：空気泡 VF：ピニロン繊維 SF：鋼繊維

### 3.2 計画調合

計画調合を表-2に示す。水結合材比 (W/B) は 20%とし、廃ガラス発泡骨材を混入する試験体は W/B=30%の試験体も作製した。骨材混入量は容積比で 50%とした。繊維の混入条件は容積比で 1%とし、起泡剤は結合材重量の 0.5%とした。打設後 1 日で脱型し、1 週の標準水中養生 (20℃) を施した。その後、耐火試験を行う試験体は炉内温度を 105℃に保った電気炉で1週間乾燥させ、絶乾状態にした。

## 4. 試験結果及び考察

### 4.1 爆裂数と圧縮強度残存率

表-3に試験体性質、耐火試験前後強度特性、有効破壊エネルギー、強度試験用供試体の爆裂数を示す。各試験体爆裂数より、空気泡およびビニロン繊維混入には爆裂を抑制する効果が見られる。繊維は耐火試験中に焼失してしまい(融点 240℃)、その際に生じるスペースがマトリックス部分の熱膨張と水蒸気圧の上昇を緩和し、

爆裂を抑制しているものと考えられる<sup>3)</sup>。

図-5に人工軽量骨材を使用したモルタル試験体と、試験体 P/A の圧縮強度残存率を示す。ペースト試験体と比較すると、モルタル試験体の強度残存率は低い値となっている。人工軽量骨材は約 1100℃で焼成されるため、炉内最高温度が 925℃の耐火試験によって骨材強度が大きく低下したとは考えにくい。従って、強度低下の原因は高温加熱による水和物の分離等によるマトリックス部分の強度低下の他に骨材附着界面の変性等も考えられる。

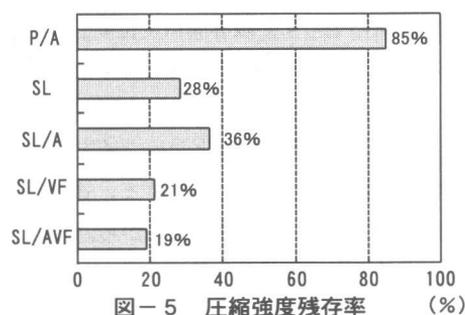


表-3 試験結果

記号	比重	空気量 (%)	耐火試験	強度 (MPa)		強度残存率 (%)		G <sub>F</sub> <sup>U</sup> (N/m)	爆裂数 (強度試験用)
				圧縮	曲げ	圧縮	曲げ		
P	2.16	4.0	前	95.5	28.6	—	—	32.1	—
			後	—	—	—	—	爆裂	3/3
P/A	1.63	29.0	前	36.3	10.6	—	—	63.0	—
			後	30.8	3.9	85.0	36.8	解析不可	1/3
SL	1.55	9.0	前	58.8	5.9	—	—	19.4	—
			後	16.7	2.0	28.4	33.6	51.8	1/3
SL/A	1.25	26.4	前	44.6	5.6	—	—	34.7	—
			後	16.2	1.5	36.3	27.1	46.2	0/3
SL/VF	1.49	11.6	前	60.8	8.6	—	—	371.0	—
			後	12.8	1.6	21.1	19.0	70.4	0/3
SL/AVF	1.01	40.5	前	27.7	5.9	—	—	502.8	—
			後	5.2	0.9	18.9	14.6	73.0	0/3
GL (20)	1.36	4.7	前	37.4	8.4	—	—	40.9	—
			後	—	—	—	—	爆裂	3/3
GL (30)	1.35	4.6	前	30.6	9.1	—	—	27.8	—
			後	15.2	8.2	49.7	90.8	解析不可	0/3
GL/VF (20)	1.31	13.3	前	36.9	39.5	—	—	615.6	—
			後	15.9	7.9	43.2	20.1	65.4	0/3
GL/VF (30)	1.29	8.4	前	27.8	36.0	—	—	450.3	—
			後	7.6	7.6	27.4	21.3	解析不可	0/3
GL/SF (20)	1.48	6.2	前	60.1	50.2	—	—	1189.1	—
			後	—	—	—	—	爆裂	3/3
GL/SF (30)	1.30	11.6	前	31.9	25.1	—	—	408.5	—
			後	7.6	8.6	23.7	34.4	181.5	0/3

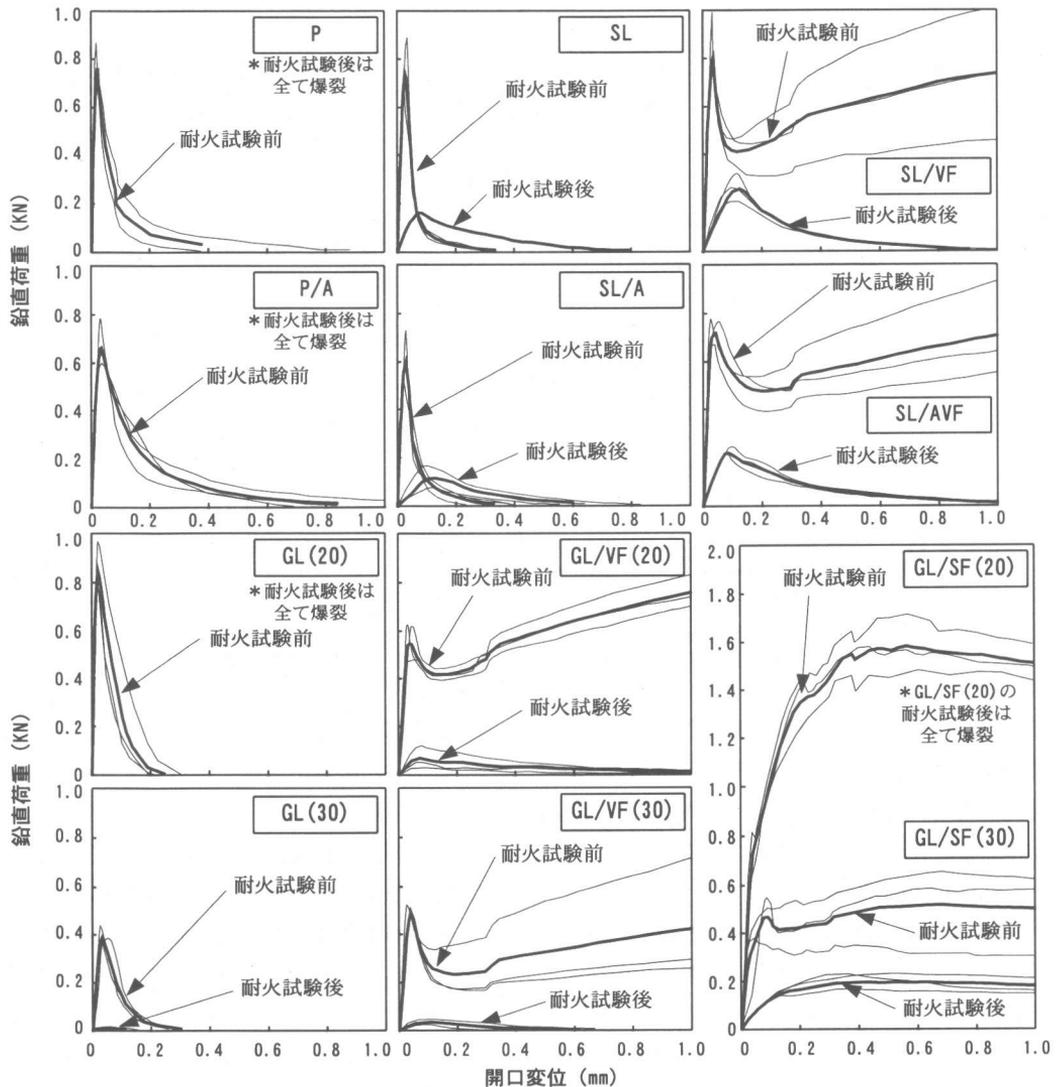


図-6 荷重-開口変位曲線

#### 4.2 荷重-開口変位曲線

図-6に荷重-開口変位曲線を示す。P(空気量4.0%)とP/A(同29.0%)を比較すると、Pの方が最大強度は大きい、P/Aの方が最大荷重後の勾配が緩やかである。これは、空気泡の影響によって、空気量の多いP/Aがより延性的な破壊形態を示しているものと考えられる。

繊維混入試験体(VF, SF)は、耐火試験前において非常に高い靱性能を示している。繊維混入により軽量コンクリートの短所である、ひび割れ、収縮等の問題を解消できる可能性がある。鋼繊維を使用した、GL/SFはビニロン繊維を使

用したものより高い靱性能を示しているが、これは繊維形状の違いによるものと考えられる(鋼繊維は両端フック付)。

耐火試験後は、ビニロン繊維混入試験体(VF)の靱性能が大きく低下している。しかしながら、繊維無混入試験体と比較すると、ビニロン繊維混入試験体の方が高い最大荷重を示している。これは、ビニロン繊維が焼失する際の熱エネルギー吸収効果と、空隙増加による水蒸気圧軽減効果によって、マトリックス部分の負担を軽減させた結果であると考えられる。

真珠岩を原料とする人工軽量骨材と、廃ガラ

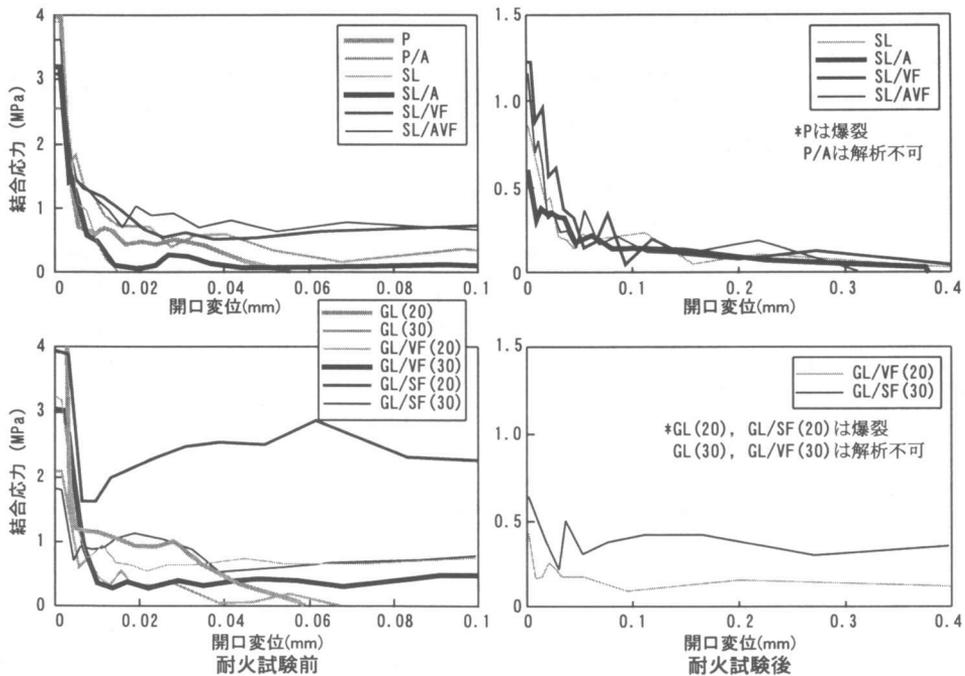


図-7 引張軟化曲線

ス発泡骨材とでは、強度面、耐火性状で大きな差が見受けられない。廃材の有効活用という地球環境保護の点を考慮すると、廃ガラス発泡骨材は非常に有用性がある骨材であると言える。

### 4.3 引張軟化曲線

図-7に引張軟化曲線を示す。それぞれの試験体において、耐火試験前後の引張軟化曲線を比較すると、耐火試験後は初期結合応力が低下しているものの、軟化曲線の勾配は緩やかとなっており、延性的な破壊形態を示している。これは、高温加熱によりマトリックス部分に多数の微細なひび割れが生じた結果と考えられる。

耐火試験後において、鋼繊維混入試験体 (GL/SF(30)) の靱性能は、ビニロン繊維混入試験体 (GL/VF(20)) よりも靱性能が大きい。ただし、W/B=20%では鋼繊維混入試験体 (GL/SF(20)) は爆裂を起こすのに対し、ビニロン繊維混入試験体では爆裂を起こさず、強度は残存する。

## 5. まとめ

本研究において以下のことが明らかになった。

(1) 起泡剤添加と、熱溶解性繊維の混入には爆

裂を抑制する効果が見られる。これは、空気泡や、繊維溶解時に生じるスペースが、水蒸気圧を軽減し、その結果、マトリックスへの負担が軽減される為と考えられる。

(2) 繊維無混入試験体は、耐火試験後に大きく強度が低下するが、破壊形態はより延性的になる。これは、加熱によりマトリックスに多数の微細ひび割れが生じ、破壊時のエネルギー吸収が大きくなる為と考えられる。

(3) W/B を低くすることは高強度化に結びつくが、爆裂の危険性が高くなる。高強度マトリックスに空気泡や熱溶解性繊維を混入することにより、火災時でも安全なコンクリートの実現が可能であると考えられる。

### 参考文献

- 1) 橋高義典ほか：高強度軽量気泡繊維補強コンクリートの破壊特性，日本建築学会構造系論文集，No.588，pp.7-11，2000
- 2) 橋高義典ほか：コンクリートの引張軟化曲線の多直線近似解析，日本建築学会構造系論文報告集，No.453，pp.15-25，1993
- 3) 山崎庸行，西田朗：耐爆裂性コンクリート，コンクリート工学，Vol.36，pp.44-47，1998