

論文 軽量コンクリートの耐火性能に関する実験的検討

宋 勲^{*1}・菅原 進一^{*2}・田村 政道^{*3}

要旨：軽量コンクリートは建築物の高層化・多様化に伴いその使用量が増大している。しかし、軽量コンクリートが火災を受けた場合、他のコンクリートより低強度にも関わらず爆裂の被害が非常に大きい。このような、火災初期に直接火炎に晒されて起きる爆裂による断面欠損および鉄筋露出は、建物崩壊の危険性を増大させる。本研究では、標準加熱による耐火試験結果をもとに爆裂を導く要因を検討したものである。実験の結果、爆裂を防ぐためには、火災初期に生じる温度勾配による非定常熱応力の対策を検討する必要があることなどが分かった。

キーワード：爆裂，高温，熱応力，軽量コンクリート，火災

1. はじめに

コンクリート構造物が火災を受けた場合、フラッシュオーバー以後の火盛り期では火災室の温度が著しく高くなり、構造部材は急激な加熱を受ける。コンクリートの内部温度は火熱を受けた表面から徐々に上昇し、温度が上昇するにつれてコンクリートの圧縮強度とヤング係数並びに鉄筋の降伏強度は低下する。また、高温に晒されたコンクリートは亀裂、ポップアウト、爆裂などの劣化現象が起こり易くなる。特に、火災初期に起きる爆裂は耐火上の大きな問題になる。火災温度の急激な上昇により、部材の断面方向に温度勾配が生じ、表層部における膨張・収縮が拘束されることになり熱応力が生じる。そのような、熱応力は爆裂と結びつく原因となり、表層の一部が破壊し脱落する。コンクリート構造物は爆裂による脱落により、断面欠損や表面およびときには内部に至るまで大きな亀裂が発生し、鉄筋の温度上昇を加速させる^{1)~10)}。今まで、コンクリートの耐火性能に関するさまざまな研究報告があるが、コンクリートの爆裂現象については、徐々に明らかになってはいるが、また、不明なことも多い。最近、

建築物の高層化、多様化に伴い軽量コンクリートの使用量が増大している。しかし、軽量コンクリートの場合、他のコンクリートより火災に弱く、爆裂が生じやすいといわれている。軽量コンクリートの高温下における劣化および爆裂メカニズムについては、解明すべき点も少なくない。そこで、本研究は、軽量コンクリートの耐火性能について、標準加熱(ISO 834)曲線を用いた耐火実験を行い実験的に検証する。また、その実験結果から軽量コンクリートの爆裂要因を検討したものである。

2. 実験概要

2.1 使用材料および調査

使用材料を表-1 に、コンクリートの調査を表-2 に示す。セメントは普通ポルトランドセメント(密度 3.16g/cm³)を、細骨材は大井川水系陸砂(表乾密度 2.60g/cm³)を、粗骨材は青梅産珪質碎石(表乾密度 2.65g/cm³)を用いた。軽量骨材は膨張頁岩(表乾密度 1.67g/cm³, 1.33g/cm³)を用いた。コンクリートはプレーンコンクリート(以下 PN), シリカフェーム入りコンクリート(以下 SF), および軽量コンクリート(以下 LW 系)

*1 東京大学大学院 工学系研究科 建築学専攻 工修 (正会員)

*2 東京大学教授 工学系研究科 建築学専攻 工博 (正会員)

*3 東京大学技術官 工学系研究科

である。また、調合は単位水量を 170kg/m^3 、W/C を 25, 35% と変化させた。スランプは $21 \pm 3\text{cm}$ 、空気量は $4 \pm 1\%$ を目安に高性能 AE 減水剤で調整した。コンクリートの練り混ぜは 100L の強制式ミキサを用い、セメントと細骨材を投入して空練り後練混ぜ水と混和剤、粗骨材の順番に投入して各 90 秒間練り混ぜた。試験体は所定の材齢まで気中養生を行った。

2.2 試験体寸法および測定

図-1 にコンクリート試験体の寸法・形状を示す。耐火試験に用いたコンクリート試験体 ($500 \times 500 \times 120\text{mm}$) は鉄筋 (D10) までのかぶり厚さ 40mm、加熱面および加熱面から 20mm 間隔で 20, 40, 60, 80mm の位置に 10 本、および鉄筋に 4 本の熱電対を設置し、試験体の内部温度を測定した。また、熱流束を測定するために壁式加熱炉のフレーム 4 箇所に熱流束計を設置した。図-2 にコンクリートの圧縮強度および含水率の関係

を示す。耐火試験時の試験体の材齢は打ち込みから 3 ヶ月のものである。耐火試験時の試験体の含水率は、PN-25, 35 は 3.3, 3.8%, SF-25, 35 は 2.7, 2.9%, LW 系は 6.1~8.8% であった。

2.3 加熱条件

加熱は図-3 の ISO 834 の標準加熱曲線により実施した¹¹⁾。

$$T = 345 \log_{10}(8t + 1) + T_0$$

ここで、 T_0 : 初期温度、時間 t の単位は(分)である。実際の建築物の火災温度は可燃物量および開口条件等により様々である。写真-1 は壁式加熱炉

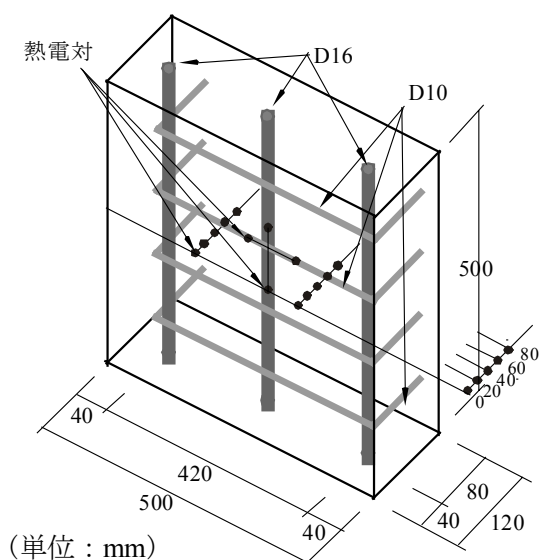


図-1 試験体の寸法・形状

表-1 使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント (密度 3.16g/cm^3)
粗骨材	青梅産珪質砕岩砕石 (表乾密度 2.65g/cm^3) 珪質砂岩
細骨材	大井川水系陸砂 (表乾密度 2.60g/cm^3)
軽量粗骨材	膨張頁岩 (表乾密度 1.67g/cm^3) 膨張頁岩 (表乾密度 1.33g/cm^3)
軽量細骨材	膨張頁岩 (表乾密度 1.87g/cm^3)
混和材	シリカフェーム (密度 2.2g/cm^3)
混和剤	ポリカルボン酸系 高性能AE減水剤

表-2 コンクリートの調合

Series	W/(C+SF) (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m^3)					混和剤 C× (%)	空気量 (%)	スランプ (cm)
			W	C	SF	S	G			
PN-25	25	45	170	680.0	•	672.5	837.8	1.0	4.6	18
PN-35	35			485.7	•	744.5	927.4	0.7	3.5	16
SF-25	25			612.0	68.0	661.5	941.6	1.1	4.8	22
SF-35	35			437.1	48.5	736.2	972.2	0.9	4.7	21
LW-35	35			485.7	•	472.5	451.5	0.2	4.9	21
SLW-35	35			485.7	•	472.5	315.0	0.6	5.2	22
LWS-35	35			485.7	•	744.5	451.5	0.4	4.9	23
SLWS-35	35			485.7	•	744.5	315.0	0.6	5.0	22

SF(シリカフェーム入りコンクリート)、シリカフェームはセメント重量に対して 10% を使用

LW-35(軽量粗骨材(1.67g/cm^3)+軽量細骨材、軽量コンクリート 2 種)、SLW-35(軽量粗骨材(1.33g/cm^3)+軽量細骨材、軽量コンクリート 2 種)

LWS-35(軽量粗骨材(1.67g/cm^3)+細骨材、軽量コンクリート 1 種)、SLWS-35(軽量粗骨材(1.33g/cm^3)+細骨材、軽量コンクリート 1 種)

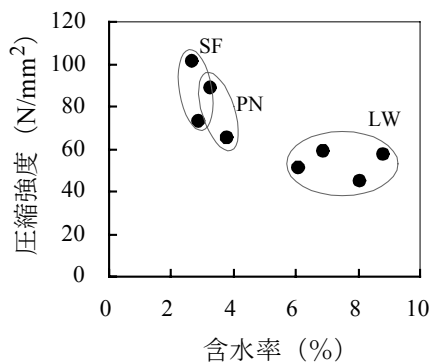


図-2 試験体の圧縮強度および含水率

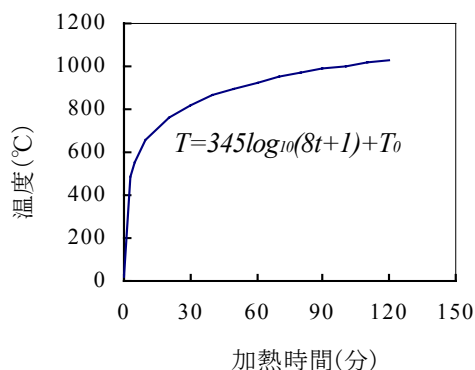


図-3 ISO834 の標準加熱曲線

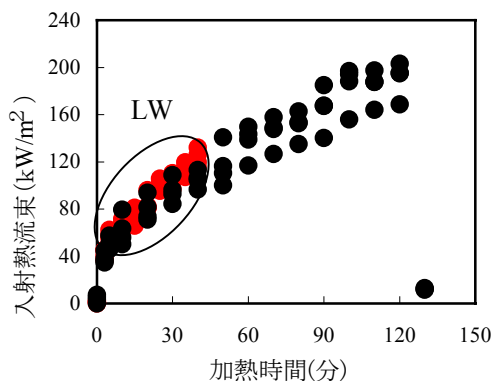


図-4 耐火試験時の試験体が受けた熱流束



写真-1 壁式加熱炉および試験体

にコンクリート試験体を設置した模様である。本試験でのコンクリート試験体の加熱時間は 2 時間加熱であり、PN, SF は 2 時間加熱を行ったが、LW 系は加熱初期から激しく爆裂し、加熱スタートから 45 分後頃に加熱を止めた。

3. 実験結果および考察

3.1 入射熱流束

図-4 に耐火試験時の試験体に入射した熱流束を示す。加熱時間の経過とともに入射熱流束も増加する。コンクリートに爆裂が起きた時の SF-25, 35 の入射熱流束は 63.3, 63.9kW/m², LW 系は 55.4~61.4kW/m²であった。この程度の熱流束は実際の火災でも十分に起る。いずれも加熱初期の爆裂時の熱流束に大きな差は見られないが、LW 系のほうが他の試験体に比べ、低い熱流束での爆裂が予想される。また、いずれの試験体に対しても、加熱時間による差はほとんど見られない。

3.2 試験体の内部温度

図-5 に 2 時間耐火試験時のコンクリート試験体の内部温度変化を示す。PN 系試験体は爆裂しなかったため、ほとんど同様の温度分布を示した。いずれも内部温度に大きな差はほとんど見られないが、PN-25 のほうが PN-35 より内部温度が高い結果を示した。これは、コンクリートの熱的性質に起因するものであり、高強度コンクリートの方が熱伝導率が高いためであると考えられる。また、加熱初期にはコンクリートの含水量、熱伝導率などにより差が生じるが、高温になるといずれのコンクリートにおいても、熱伝導率が低くなるため、大きな差が生じなかったと考えられる。加熱面から同一距離にあるコンクリートと鉄筋の温度差はほとんど見られない。また、PN 系はいずれの試験体も鉄筋温度は 500℃以下であった。シリカフュームを入れた SF 系は、加熱初期の爆裂により PN 系に比べ、かなりの温度上昇があった。加熱初期の爆裂による試験体の断面欠損は内部温度が上昇する要因となる。フープ筋が火炎に露出した SF-25 の

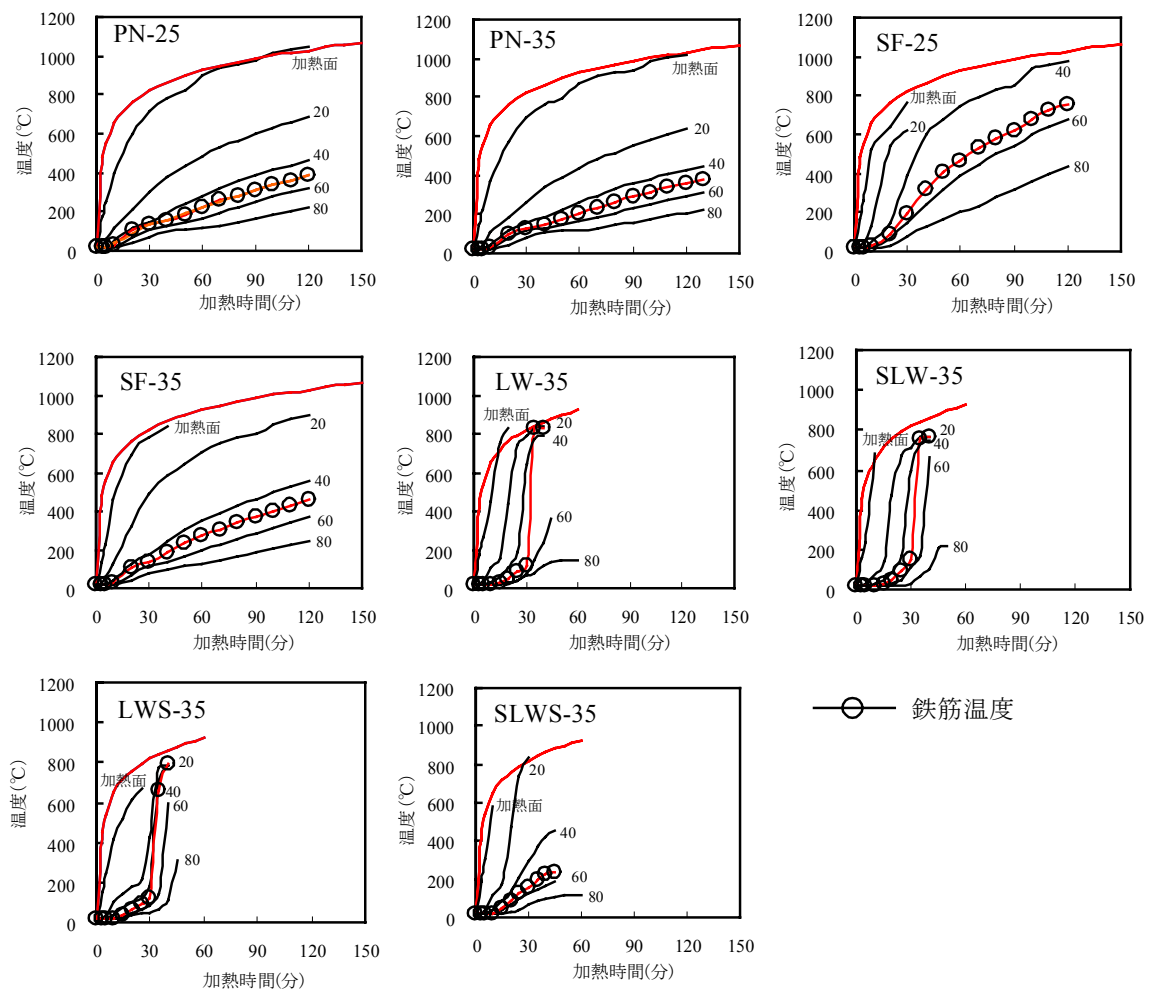


図-5 耐火試験時の試験体の内部温度変化

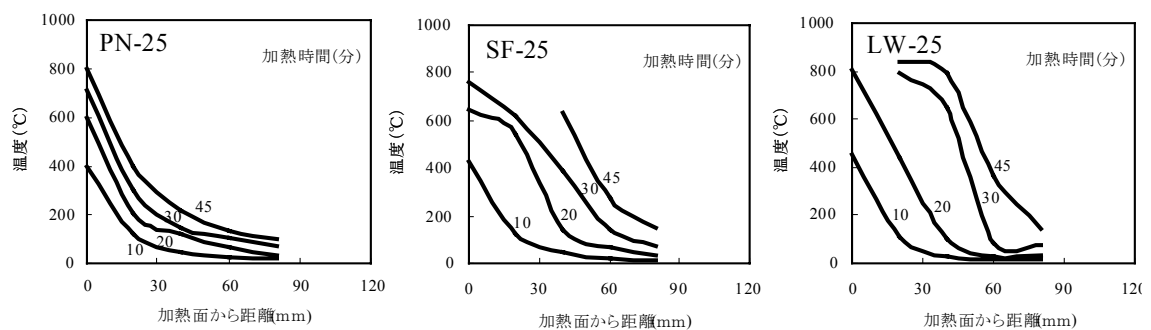


図-6 加熱面からの試験体内部の温度勾配

場合、内部温度が急激に上昇し、約 1 時間後、鉄筋の温度が 500℃を超えた。SF-35 の場合、爆裂はあったが、表層部の脱落が浅いため、鉄筋温度は 500℃以下であった。LW 系は加熱初期から激しく爆裂し、温度が急上昇した。SLWS-35 を除いたいずれの試験体もフープ筋および主筋が火炎に晒され、加熱後 30 分頃に主筋の温度が 800℃に達した。図-6 に加熱面からの試験体内

部への温度勾配を加熱時間別に示す。これらは各試験体に対する、非定常状態の温度分布である。PN-25 の場合、加熱時間の経過とともに内部温度も徐々に上昇するが、爆裂があった SF-25、LW-35 の場合、PN-25 より温度の上がり方が激しく、加熱面からの温度勾配も相異なる。また、軽量コンクリートの場合、爆裂が止まらなく、内部まで進む傾向を示した。短時間の火災でも爆裂

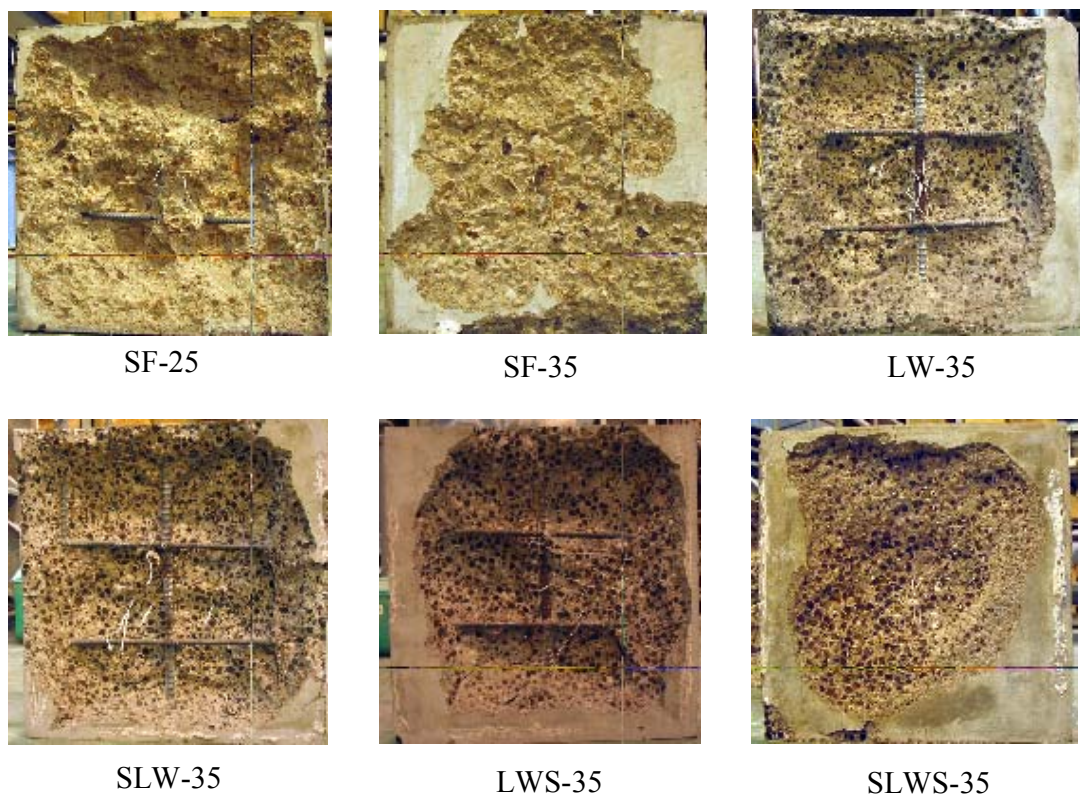


写真-2 耐火試験後の試験体の加熱面

表-3 耐火試験結果

	PN-25	PN-35	SF-25	SF-35	LW-35	SLW-35	LWS-35	SLWS-3
圧縮強度, 28d(N/mm ²)	89	65	101	73	57	45	59	51
単位質量 (kg/m ³)	2341	2313	2322	2311	1790	1616	2030	1896
実験時の含水率 (%)	3.3	3.8	2.7	2.9	8.8	8.1	6.9	6.1
爆裂の有無	×	×	○	○	○	○	○	○
最大爆裂深さ (mm)	・	・	63	16	81	80	86	31
平均爆裂深さ (mm)	・	・	41	12	70	68	69	25
爆裂開始時間 (Min)	・	・	9	10	5	6	5	7
爆裂終了時間 (Min)	・	・	27	24	45	45	45	25
爆裂開始時の熱流束 (kW/m ²)	・	・	63.3	63.9	55.4	61.2	55.4	61.4
爆裂開始時の炉内温度 (°C)	・	・	642	658	556	583	556	605
主筋の最高温度 (°C)	404	378	717	458	830	764	809	236
フープ筋の最高温度 (°C)	479	466	954	559	850	778	827	332

PN, SF 系は標準加熱曲線により2時間加熱, LW 系は爆裂により45分で中止

による断面欠損の危険性が予想される。軽量コンクリートの激しい爆裂は、他のコンクリートに比べ、高い含水率および低い熱伝導率に起因するものであると考えられる。軽量コンクリートの耐火性能を向上するためには、温度勾配により生じる非定常熱応力に対する対策は不可欠なものと考えられる。

3.3 耐火性能評価

写真-2 は2時間加熱後の試験体の加熱面である。PN系は爆裂が見られないが、骨材の周辺には大きな亀裂やポップアウトが発生した。そして、亀裂およびポップアウトは、強度が高いほど顕著であった。また、SF系はいずれも爆裂したが、強度が高いSF-25のほうがSF-35より爆裂が顕著であった。さらに、PN系より低い含水率を示したが、爆裂が顕著であった。その理由

はシリカフェュームの混入により組織が密実になるためである。LW 系は最も激しく爆裂し、鉄筋および断面欠損も他の試験体に比べて大きい。その理由は、低強度、高い含水率および温度勾配により加熱面に生じる熱応力によるものであると考えられる。

4. まとめ

本研究は、コンクリートの加熱初期における爆裂発生に関する研究の一部として検討したものである。コンクリート試験体を用いた耐火試験の結果から次のような知見が得られた。

- (1) コンクリートに爆裂が起きた時の SF-25, 35 の入射熱流束は 63.3, 63.9kW/m², LW 系は 55.4～61.4kW/m² であった。いずれの試験体に対し、爆裂時の熱流束に大きな差は見られなかった。また、LW 系の方が SF 系より低い熱流束で爆裂が見られた。
- (2) PN 系試験体は、ほとんど同様の温度分布を示し、内部温度に大きな差はほとんどなかった。SF 系は、加熱初期の爆裂により PN 系に比べてかなりの温度上昇があった。LW 系は、加熱初期から激しく爆裂し、温度の急上昇が見られた。
- (3) LW 系の場合、他の試験体に比べて温度勾配が大きい。このような結果は、いずれも熱的性質に起因するものであり、軽量コンクリートの耐火性能の向上には、温度勾配により生じる非定常熱応力に対する検討が不可欠なものと考えられる。

謝辞

本研究にあたり、建築研究所の遊佐秀逸氏、(株)大林組の村岡宏氏にご助言を頂きました。また、本研究の実験に参加した岡部弘志氏、望月秀敏氏、吉岡秀樹に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 耐火性能検証法の解説及び計算例とその解説, 2001 年版
- 2) 森 実, “建築材料の火災時における高温性状に関する研究” 博士学位論文, 東京大学, 1975
- 3) 長尾覚博他, “高温を受けるコンクリート部材の水分移動と圧力形成に関する模型実験” 日本建築学会構造系論文集, pp1～10, No.452, 1993
- 4) 宋 勲他, “火災時におけるコンクリート部材の爆裂に関する研究” 日本建築学会学術講演概要集, pp81～82, 2000
- 5) 宋 勲他, “高温時におけるコンクリート内部応力解析” 日本コンクリート工学協会年次論文集, Vol.23, No.2, pp895～900, 2001
- 6) NIST GCR 99-767, Response of High Strength Performance Concrete to Fire Conditions: Review of Thermal Property Data and measurement Techniques, 1999
- 7) NIST IR 6210, Experimental Plan for Testing the Mechanical Properties of High-Strength Concrete at Elevated Temperatures, 1999
- 8) U Schneider, Effect of Biaxial Loading on the High Temperature Behaviour of Concrete, Fire Safety Science, Proceedings of the First International Symposium, pp281～290, 1986
- 9) NIST IR 5934, Fire performance of High-Strength Concrete: A Report of the State-of-the-Art, 1996
- 10) Zdenek P. Bazant, Concrete at High Temperature : Material Properties and Mathematical Models
- 11) ISO 834-1, Fire Resistance Test, Element of Building Construction, general Requirements for Fire Resistance testing, Final Draft ISO TC92/SC2, 1997