

ポリプロピレン製短繊維を用いた高強度コンクリート柱の 耐火性確保に関する報告

山田 修大* 鶴見 淳也*
李 暁赫*

要 旨

近年、集合住宅を中心に鉄筋コンクリート造建築物の高層化が進み、設計基準強度 80~150N/mm²の高強度コンクリートの需要が増大している。しかし、高強度コンクリートは通常のコンクリートに比べ、火災時に爆裂現象が起りやすいという課題がある。この爆裂現象の抑制方法として、コンクリートにポリプロピレン製短繊維(以下、PP 繊維)を混入する方法が一般的に知られている。PP 繊維を用いた高強度コンクリート柱の耐火性についてはすでに報告されており、当社では簡易的な試験を行い、径 41 μm、長さ 12mm の PP 繊維を用いた高強度コンクリートの耐火性を評価している。そこで本検討では、径 41 μm、長さ 12mm の PP 繊維を用いた高強度コンクリート柱を対象とし、荷重が作用した状態での耐火性を確認することを目的として載荷加熱試験を実施した。本報では、その結果について報告する。

1. はじめに

近年、集合住宅を中心に鉄筋コンクリート造建築物の高層化が進み、設計基準強度 80~150N/mm²(以下、Fc80~150)の高強度コンクリートの需要が増大している。しかし、高強度コンクリートは通常のコンクリートに比べ、火災時に爆裂現象が起りやすいという課題がある。この爆裂現象を抑制する方法として、コンクリートにポリプロピレン製短繊維(以下、PP 繊維)を混入することが一般的に知られている。これは、PP 繊維が高温により消失して空洞を形成し、爆裂の原因とされる水蒸気圧や熱応力を緩和させるものと考えられている。PP 繊維を用いた高強度コンクリート柱の耐火性についてはすでに報告されており^{例えば 2-4)}、その長さや径、混入量によって爆裂現象を抑制する効果が異なることなどが示されている。当社では、これまでに断面形状や長さ、混入量を変化させた高強度コンクリートの耐火性能について、簡易的な試験を行い評価し、径 41 μm、長さ 12mm の PP 繊維の有効性を確認している⁵⁾。

そこで本検討では、同仕様の PP 繊維を混入した Fc80、Fc120 および Fc150 の高強度コンクリート柱を対象とし、荷重が作用した状態での耐火性を確認することを目的として載荷加熱試験を実施した。本報では、その結果について報告する。

2. 試験体

2.1 使用材料

(1) コンクリート

各試験体のコンクリートの使用材料を表-1~表-3に示す。セメントは、Fc80 に中庸熱ポルトランドセメント、Fc120 および Fc150 にシリカフェーム混合セメントを使用した。

表-1 コンクリート使用材料(Fc80)

名称	記号	種類	備考
セメント	M	中庸熱 ポルトランドセメント	—
細骨材	S1	砂	砂:砕砂=50:50 (質量比)
	S2	砕砂	
粗骨材	G	石灰岩砕石 2005	—
混和材	PP	ポリプロピレン製短繊維	繊維径:41 μm、長さ:12mm 密度:0.91g/cm ³
混和剤	SP	高性能 AE 減水剤	ポリカルボン酸 エーテル系化合物

表-2 コンクリート使用材料(Fc120)

名称	記号	種類	備考
セメント	SFC	シリカフェーム混合セメント	—
細骨材	S	山砂	—
粗骨材	G	硬質砂岩砕石 2005	—
混和材	PP	ポリプロピレン製短繊維	繊維径:41 μm、長さ:12mm 密度:0.91g/cm ³
混和剤	SP	高性能 AE 減水剤	ポリカルボン酸 エーテル系化合物

表-3 コンクリート使用材料(Fc150)

名称	記号	種類	備考
セメント	SFC	シリカフェーム混合セメント	—
細骨材	S	硬質砂岩砕砂	—
粗骨材	G	硬質砂岩砕石 2005	—
混和材	PP	ポリプロピレン製短繊維	繊維径:41 μm、長さ:12mm 密度:0.91g/cm ³
混和剤	SP	高性能 AE 減水剤	ポリカルボン酸 エーテル系化合物

* 技術研究所 建築技術開発部

(2) 鉄筋

各試験体に用いた鉄筋および配筋要領を表-4に示す。

2.2 コンクリートの割合

各試験体に用いたコンクリートの割合を表-5に示す。PP 繊維の混入量は過去に実施した簡易耐火試験等⁵⁾の結果を参考に設定し、Fc80、Fc120、Fc150 に対しそれぞれ 0.15、0.20、0.25vol%とした。

2.3 試験体の形状および寸法

(1) 荷重加熱試験用の柱試験体

試験体は、表-4に示した鉄筋と、表-5に示した割合のコンクリートを用いて製作した。試験体の形状および寸法、配筋と温度測定位置を図-1に示す。試験体の断面は荷重軸力を考慮し、400mm×400mmとした。また、試験体の高さ(長さ)は試験装置に合わせて、Fc80は3,300mm(加熱区間2,950mm)、Fc120およびFc150は3,500mm(加熱区間3,000mm)とした。

試験体内部の温度を測定する熱電対(K型)は、図-1に示す位置に同一断面でコンクリート温度測定用7箇所、鉄筋温度測定用4箇所を設置し、高さ方向に3断面(コンクリート:7箇所×3断面=21箇所、鉄筋:4箇所×3断面=12箇所、合計33箇所)設置し、それぞれの温度を測定した。試験体は屋外にて打込み後、1週間(Fc80のみ2週間)で型枠を脱型し、その後は試験日まで温湿度非制御の屋内で気中養生を行った。

(2) 圧縮強度・含水率測定用の模擬試験体

圧縮強度および含水率の測定に用いた模擬試験体の概要を図-2に示す。模擬試験体は、図-1に示す柱試験体と同時に製作し、同一の環境下で養生を行った。圧縮強度の測定は材齢91日および荷重加熱試験日用の2本の模擬試験体からそれぞれ切り出した4本ずつのコア供試体を用いた。含水率の測定には角柱供試体を用いた。含水率は、角柱供試体の乾燥前質量(W_w)と105℃乾燥後質量(W_d)から、以下の式(1)により求めた。

$$\text{含水率}(\%) = (W_w - W_d) / W_d \times 100 \quad (1)$$

3. 試験方法

3.1 荷重・加熱方法

荷重加熱試験に用いた試験装置と軸方向収縮量の測定位置を図-3、4に示す。Fc80では試験装置Aを、Fc120およびFc150では試験装置Bを用いた。

軸力比は0.33(設計基準強度/3)とし、試験体への荷重を行った。荷重は、加熱開始から加熱が終了し、試験体の温度が低下するまで続いた。加熱はISO-834に規定される標準加熱曲線による3時間加熱とした。温度測定は、加熱終了後、各測定点の温度が最高温度を記録し、低下することを確認するまで続いた。

3.2 評価方法

荷重加熱試験における試験体の耐火性能の評価基準を表-6に示す。

表-4 使用鉄筋および配筋要領

試験体	主筋	せん断補強筋	鉄筋比 Pg	せん断補強筋比 Pw
Fc80	12-D19 (SD490)	4-D10@90 (SHD685)	2.15%	0.79%
Fc120	12-D19 (SD490)	4-U9.0@80 (SBPD1275)	2.15%	0.80%
Fc150	12-D19 (USD685)	4-U9.0@80 (SBPD1275)	2.15%	0.80%

表-5 割合

試験体	W/C (%)	s/a (%)	単位量						SP (C×%)	PP* (vol%)
			W	C		S		G		
				M	SFC	S1	S2			
Fc80	24.0	42.4	170	709	—	325	325	915	適宜	0.15
Fc120	15.2	34.7	160	—	1053	435	—	824	適宜	0.20
Fc150	12.6	23.5	160	—	1270	250	—	824	適宜	0.25

*容積に対して外割りで使用

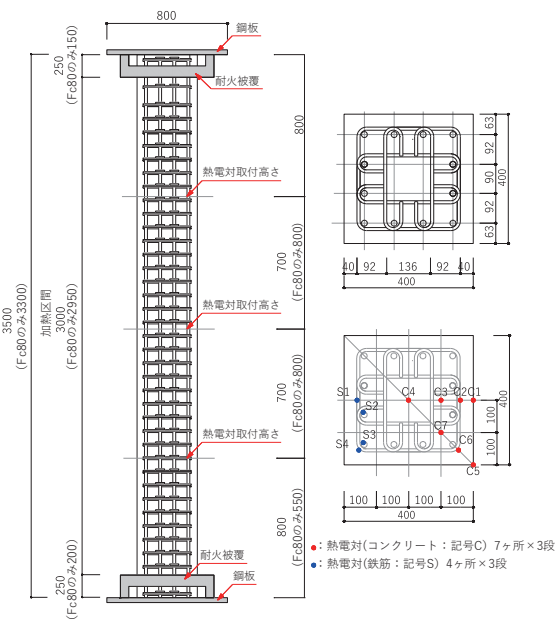


図-1 試験体形状および配筋図

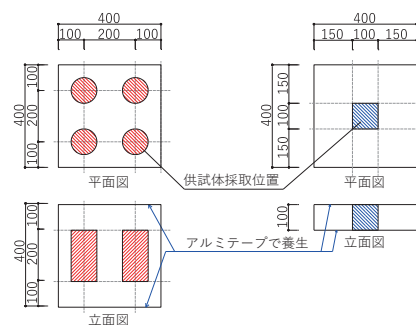


図-2 模擬試験体概要
(左: 圧縮強度試験用、右: 含水率測定用)

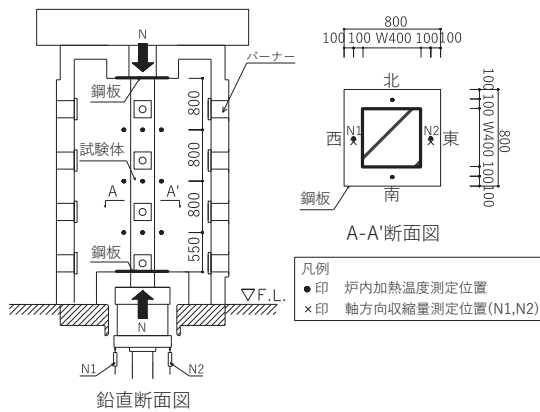


図-3 荷重加熱装置(試験装置 A)

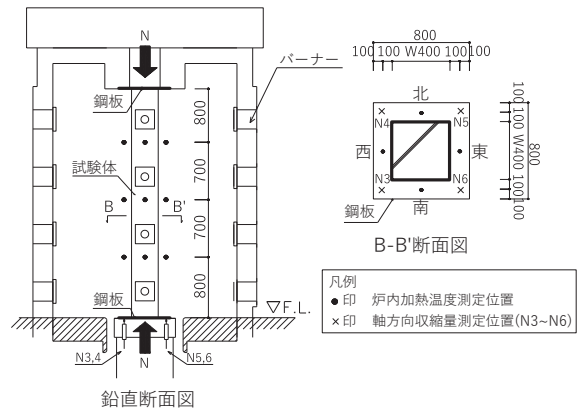


図-4 荷重加熱装置(試験装置 B)

表-6 柱の耐火性能に関する評価基準

試験体	最大軸方向収縮量 ^{*1} (mm)	最大軸方向収縮速度 ^{*2} (mm/分)
Fc80	33.0 以下	9.9 以下
Fc120	35.0 以下	10.5 以下
Fc150	35.0 以下	10.5 以下

*1 最大軸方向収縮量(mm)：試験体の全長×1/100

*2 最大軸方向収縮速度(mm/分)：試験体の全長×3/1000

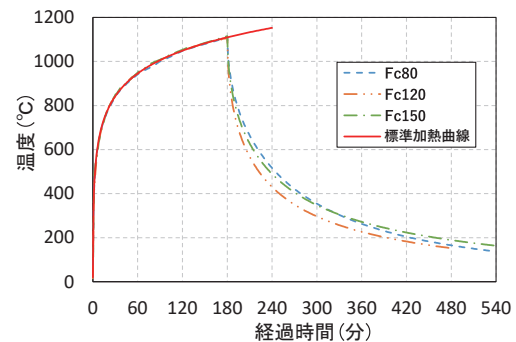


図-5 炉内温度の経時変化

4. 実験結果

4.1 コンクリートにおける各試験の結果

コンクリートにおける各種試験結果を表-7に示す。各試験体の材齢 91 日および荷重加熱試験日の圧縮強度は設計基準強度を上回っていることが確認できた。

4.2 加熱時の試験体の状況

各試験体の荷重加熱試験時において測定した炉内の平均温度と標準加熱曲線を図-5に示す。また、荷重加熱試験後の各試験体の状況を写真-1に示す。爆裂現象(一部剥離)の発生は、Fc80で加熱開始11分から13分まで、Fc120で9分から19分まで、Fc150で12分から18分までみられたが、それ以降はみられなかった。また、剥離の深さはいずれの試験体においても10~20mmとなり、せん断補強筋の露出はみられなかった。これらのことから、各試験体の爆裂現象(一部剥離)の発生状況には大差がないことがいえる。

以上より、簡易耐火試験等の結果を参考に設定したPP繊維の混入量は、各設計基準強度の高強度コンクリートの爆裂現象の抑制に対して適切であったと考えられる。

4.3 コンクリートおよび鉄筋の温度測定結果

各試験体表層からの距離毎のコンクリートおよび鉄筋の最高温度を図-6~図-8に示す。なお、図中の平面部が図-1に

表-7 コンクリートにおける各試験の結果

試験体	フレッシュコンクリート試験			圧縮強度 ^{*1} (N/mm ²)		含水率 ^{*4} (%)
	スランプフロー 平均値(cm)	空気量 (%)	CT (°C)	材齢 91日	荷重加熱試験 日の材齢 ^{*3}	
Fc80	63.5	2.6	24	98.1	110	4.2(17)
Fc120	64.0	1.9	21	150	164	4.9(10)
Fc150	61.5	3.3	24	157 ^{*2}	178	2.7(19)

*1 4本のコア供試体により測定した圧縮強度の平均値

*2 材齢90日の試験結果

*3 Fc80:材齢237日 Fc120:材齢265日 Fc150:材齢188日

*4 表中の()内は105°Cで試験体の質量変化がなくなるまでの乾燥日数

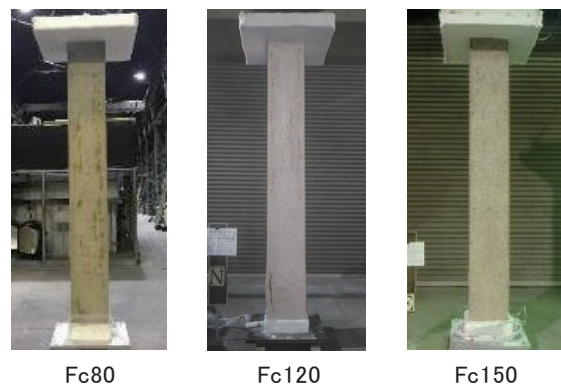


写真-1 荷重加熱試験後の各試験体

示しているC1～C4とS1、S2、隅角部がC5～C7とS3、S4で測定された最高温度を表している。いずれの試験体においても、鉄筋とコンクリートの温度がほぼ同程度であるため、以降の考察では、表層からの距離と鉄筋およびコンクリートの温度の関係は同一であるものとした。

設計基準強度と最高温度の関係を見ると、表層から50mm付近における平面部では $Fc80 > Fc120 > Fc150$ の関係となっているものの、隅角部では設計基準強度にかかわらず3体とも概ね同等だった。また、表層から100mmまでの範囲では、表層からの距離が大きくなるほど最高温度が低くなっているのに対し、100mm以降は変化がみられない。コンクリートおよび鉄筋の温度が500℃を超えると、加熱後の残存強度や弾性係数が大幅に低下し⁶⁾、再使用する場合は柱の補修が必要になることから、各

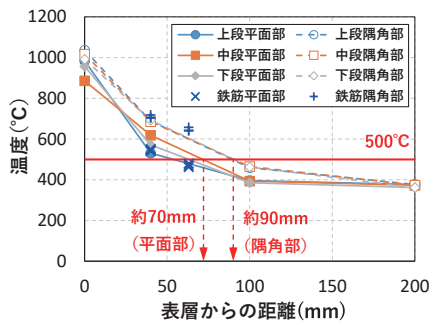


図-6 コンクリートおよび鉄筋の最高温度(Fc80)

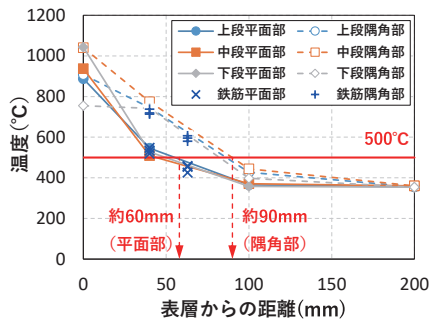


図-7 コンクリートおよび鉄筋の最高温度(Fc120)

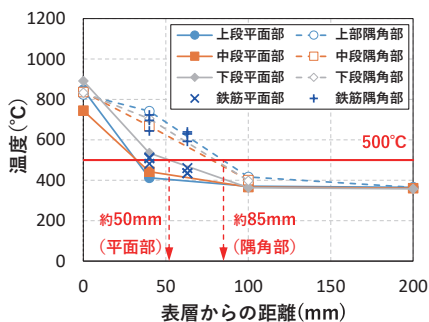


図-8 コンクリートおよび鉄筋の最高温度(Fc150)

試験体における鉄筋の温度を500℃以下に抑えるために必要な表層からの距離(かぶり厚さ)を図-6～図-8中および表-8に示す。なお、ここでのかぶり厚さは、上段、中段、下段における測定値のうち、温度が500℃になった時点で最も表層からの距離が大きい値を示している。隅角部において必要なかぶり厚さは3体とも概ね同等であるが、平面部については設計基準強度が高いほど500℃以下に抑えるために必要なかぶり厚さが小さくなる傾向にあった。

4.4 軸方向収縮量および収縮速度の測定結果

各試験体に関して測定した軸方向収縮量の測定値を図-9に、軸方向収縮速度の測定値を図-10に示す。また、本実験では試験体の長さがそれぞれ異なるため、各試験体の結果の比較を行うために、試験体全長に対する収縮量または収縮速度の比率を算出した。算出結果を、図-11、12に示す。試験体の収縮量および収縮速度の比率は、 $Fc80 < Fc120 \approx Fc150$ の関係になっている。設計基準強度が高いほど収縮量と収縮速度の比率が大きくなる傾向にあるものの、全ての試験体において表-6に示した基準値以下を確保している。このことから、簡易耐火試験等の結果を参考に設定した量の繊維を混入させた柱は、火災による破壊その他の損傷を生じない性能(非損傷性)を有することを確認した。

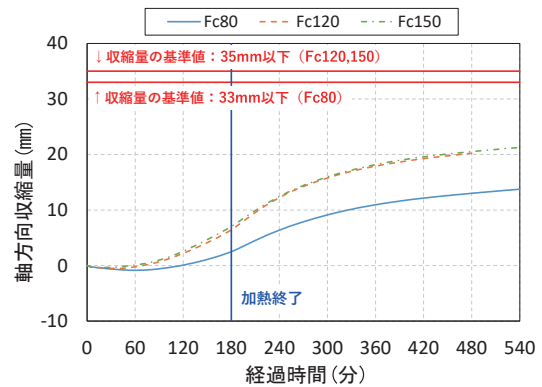


図-9 軸方向収縮量の測定値

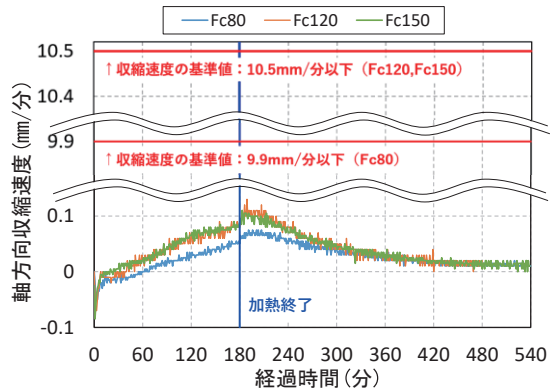


図-10 軸方向収縮速度の測定値

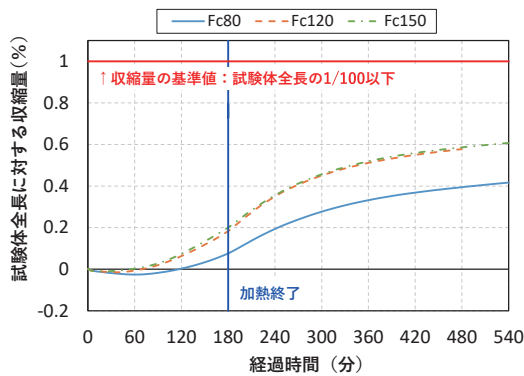


図-11 試験体全長に対する軸方向収縮量の比率

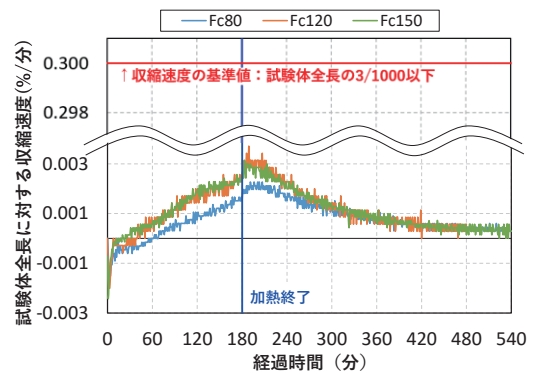


図-12 試験体全長に対する軸方向収縮速度の比率

表-8 必要なかぶり厚さ

試験体	かぶり厚さ	
	平面部	隅角部
Fc80	約 70mm	約 90mm
Fc120	約 60mm	約 90mm
Fc150	約 50mm	約 85mm

表-9 設計基準強度ごとの PP 繊維の混入量

	設計基準強度 F_c (N/mm ²)		
	$F_c=80$	$80 < F_c \leq 120$	$120 < F_c \leq 150$
PP 繊維の混入量	0.15vol% [1.365kg/m ³]	0.20vol% [1.820kg/m ³]	0.25vol% [2.275kg/m ³]

5. 設計基準強度ごとの PP 繊維混入量

これまで検討してきた結果より、Fc80 以上 Fc150 以下の高強度コンクリートの爆裂抑制対策として必要な PP 繊維の混入量は表-9に示すとおりとして設定した。

6. まとめ

本実験では、径 41 μ m、長さ 12mm の PP 繊維を使用し、混入量を Fc80 で 0.15vol%、Fc120 で 0.20vol%、Fc150 で 0.25vol% とした高強度コンクリート柱に対して、軸力比を計画段階において 0.33 (設計基準強度/3) として、それぞれの耐火性能を確認した。実験結果から、本検討の範囲内で、以下の知見が得られた。

(1) 爆裂性状

いずれの試験体においても加熱開始 10 分前後から表層の剥離(一部爆裂)が始まったものの、加熱開始約 20 分まで継続し、その後はみられなかった。このことから、本報で使用した繊維の種類および混入量は、各設計基準強度の高強度コンクリートの爆裂現象の抑制に対して適切であったと考えられる。

(2) 温度性状

設計基準強度が高いほど、表層から 50mm 付近における平面部の温度は低く、鉄筋およびコンクリートの温度を 500°C 以内に抑えるために平面部に必要なかぶり厚さは小さくなる傾向にある。

(3) 軸方向収縮量および収縮速度

設計基準強度が高いほど収縮量と収縮速度が大きくなる傾向にあるものの、全ての試験体において基準値以下を確保していた。

このことから、簡易耐火試験等の結果を参考に設定した量の繊維を混入させた柱は、火災による破壊その他の損傷を生じない性能(非損傷性)を有することを確認した。

【参考文献】

- 1) 日本建築学会:高強度コンクリート施工指針・同解説, 2013.11
- 2) 松戸正士,吉野茂,若松高志,近藤悟,佐々木仁,平島岳夫,吉田正友,上杉英樹,斎藤光ほか:超高強度材料を用いた鉄筋コンクリート柱の耐火性に関する研究 その 1~2,日本建築学会大会学術講演梗概集, 2002.8
- 3) 藤中英生,三井健郎,米澤敏男,古平章夫:ポリプロピレン繊維を混入した高強度 RC 柱の耐火性能, 日本火災学会論文集, vol.54, No.1, pp.17-23, 2004
- 4) 丹波博則,瀬川紘史,一瀬賢一,津田和明,長沼一洋: Fc80~180N/mm²級高強度コンクリートを用いた RC 柱の耐火性能 その 1~2, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2,pp.253-256,2008
- 5) 竹内博幸,高橋祐一,山本基由:簡易耐火試験による超高強度コンクリート爆裂対策の検討, コンクリート工学年次論文集, vol.34, No.1, 2012
- 6) 一瀬賢一,長尾覚博,川口徹:高温加熱下における高強度コンクリートの力学的性質に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, vol.21, No.2, 1999