

論文 200MPa 級超高強度コンクリートを用いた RC 柱の耐火性能

崔 景喆*1・金 圭庸*2・Nenad Gucunski*3・金 武漢*4

要旨： 超高強度コンクリートを用いた建築構造部材は高温を受ける場合、コンクリート内部の緻密な組織構造によって爆裂の発生や強度が低下するなどコンクリートの耐力が低下する。このため、建築構造部材の火災安全性を確保するためには残存耐力を確認する必要がある。本実験では、200MPa 級超高強度コンクリートを用いた鉄筋コンクリート（RC）柱に対して ISO-834 標準加熱曲線による 3 時間の加熱試験を行った。この結果、3 時間加熱によって爆裂が発生し、26%の断面損失が生じたが、設計耐力の 52%の耐力が残っていることが確認できた。また、高温材料特性を考慮し耐力を計算した結果、実際残存耐力の 70%程度で予測できた。

キーワード： 超高強度コンクリート、耐火性能、爆裂性状、残存耐力、熱伝達解析、ISO-834 標準加熱曲線

1. はじめに

超高強度コンクリートは高い圧縮強度と剛性によって建築構造部材の断面を縮めることができ、超高層と長大型構造物に適用されている¹⁻³⁾。

超高強度コンクリートの圧縮強度発現のためには低い水結合材比、高い単位結合材量、高性能減水剤などの調合設計が要求される。このような超高強度コンクリートの調合要因によってコンクリートの内部組織構造は非常に緻密になって、火災などの高温条件下でコンクリートの爆裂発生や圧縮強度の低下が生じる原因になることもある。

従って、超高強度コンクリートを用いた建築構造部材の構造的安全性を確保するためには耐火性能の評価と火災環境下での残存耐力を確かめる必要がある。

一方、コンクリートを用いた建築構造部材の火災安全性を確保するためにコンクリートの爆裂特性、高温強度の低下、部材の耐火性能などの様々な研究が成されてきた⁴⁻⁹⁾。

しかしながら、今までの研究ではコンクリートの圧縮強度が 100MPa 以下のコンクリートを対象とし評価したものが多く、100MPa 以上の超高強度コンクリートを用いた建築構造部材に関する研究報告は稀の状況である^{10,11)}。

そこで本研究では 200MPa 級超高強度コンクリートを用いた RC 柱の耐火性能と残存耐力を評価した後、残存耐力予測の有効性を既存研究¹²⁾と比較し検討を行った。

2. 繊維混入による超高強度コンクリートの爆裂特性

2.1 爆裂特性評価の概要

超高強度コンクリートを用いた RC 柱の耐火性能評価に先立って、表 1 の実験計画のように有機繊維の混入

表 1 実験計画

f_{ck} (MPa)	有機繊維*		加熱方法	評価項目
	種類	混入率 (vol%)		
100	NY	0.00	ISO-834 標準加熱曲線 (50 分間加熱)	・爆裂性状 ・質量減少率
150	PP	0.15		
200	NY+PP	0.25		

*NY: ナイロン繊維, PP: ポリプロピレン繊維,

表 2 使用材料の物理的性質

材 料	物 理 的 性 質
セメント(C)	普通ポルトランドセメント 密度: 3.15g/cm ³ ,比表面積: 3,200cm ² /g
高炉スラグ(BFS)	密度: 2.97g/cm ³ ,比表面積: 6,000cm ² /g
シリカフューム(SF)	密度: 2.57g/cm ³ ,比表面積: 200,000cm ² /g
フライアッシュ(FA)	密度: 2.20g/cm ³ ,比表面積: 3,000cm ² /g
無水石膏(Gy)	密度: 2.90g/cm ³ ,比表面積: 3,550cm ² /g
粗骨材(S)	花崗岩碎石 最大寸法: 13mm,密度:2.7g/cm ³ ,吸水率: 0.9%
細骨材(G)	海砂, 密度: 2.65g/cm ³ , 吸水率: 1.0%
混和剤	高性能減水剤(ポリカルボン酸系)
ナイロン繊維	長さ:12mm,直径:12 μm,密度: 0.91 g/cm ³
ポリプロピレン繊維	長さ:12mm,直径:12 μm,密度: 0.91 g/cm ³

表 3 コンクリートの調合

f_{ck} (MPa)	f_{cu} (MPa)	W/B (%)	Slump Flow (mm)	Air (%)	S/a (%)	単位重量 (kg/m ³)									
						W	C	BFS	FA	SF	Gy	S	G		
100	101	20.0	750 ± 100	2 ± 1	43	150	525	0	150	75	0	644	870		
150	149	14.5			35	150	652	207	0	124	52	448	848		
200	205	12.5			35	150	660	240	0	240	60	389	736		

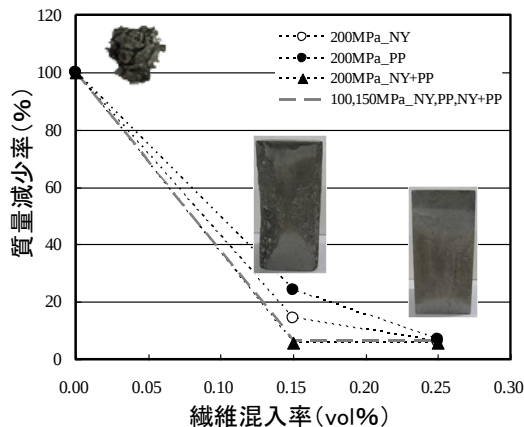
f_{ck} : 設計基準強度, f_{cu} : 実強度

*1 大韓民国 忠南大学校 大学院 建築工学科 博士課程 (正会員)

*2 大韓民国 忠南大学校 工科大学 建築工学科 教授 博士 (工学) (正会員)

*3 Professor of Civil and Environmental Engineering at Rutgers, The State of University of New Jersey

*4 大韓民国 忠南大学校 工科大学 建築工学科 名誉教授 博士 (工学) (正会員)



図－1 繊維混入率による

超高強度コンクリートの爆裂性状と質量減少率

による超高強度コンクリートの爆裂特性を評価した。

圧縮強度は 100, 150 及び 200MPa の 3 水準, 有機繊維種類は NY (ナイロン繊維), PP (ポリプロピレン繊維), NY+PP (ナイロン繊維+ポリプロピレン繊維) の 3 水準, 繊維混入率は 0.00, 0.15 及び 0.25vol% 混入の 3 水準で 27 水準 のパラメータを設定した。NY+PP は二つの繊維を同じ割合で用いた。また, 本実験で用いた材料の物理的性状と超高強度コンクリートの調合を表－2 と表－3 に示す。

試験体は圧縮強度, 繊維種類及び混入率条件のを 100×100×200mm の角形試験体で圧縮強度, 27 本を作製し,

ISO-834 標準加熱曲線を用いて 50 分間加熱実験を行った後, 爆裂性状と質量減少率を測定した。

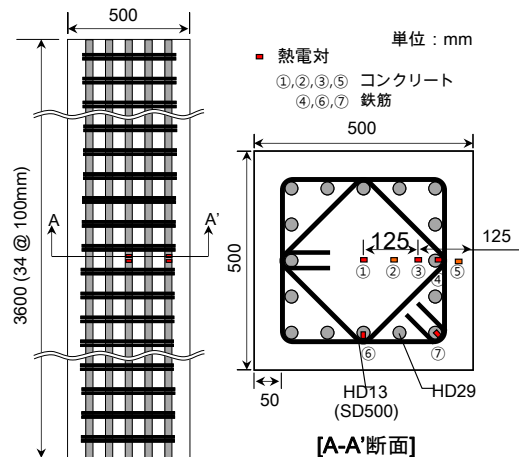
2.2 超高強度コンクリートの爆裂性状及び質量減少率

図－1 に繊維混入による超高強度コンクリートの爆裂性状と質量減少率を示す。繊維を混入しない超高強度コンクリート試験体は激しい爆裂によって破れ, 質量減少率が測定できなかった。

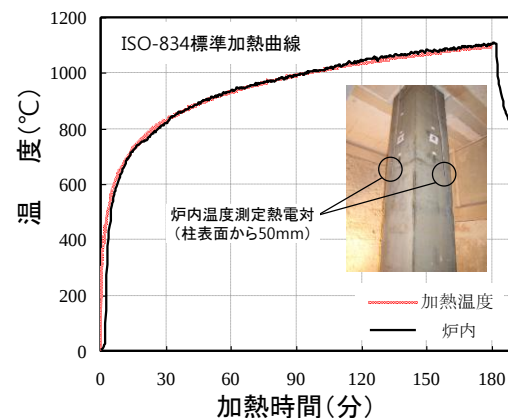
有機繊維が混入された圧縮強度 100, 150MPa の超高強度コンクリート試験体は繊維混入条件に関わらず, 繊維混入率 0.15vol% 以上で爆裂が生じなかったが, コンクリート内部の水分蒸発により約 6% 程度の質量減少量があった。

しかし, 圧縮強度 200MPa 超高強度コンクリート試験体は PP 繊維 0.15vol%, NY 繊維 0.15vol% の混入率で試験体の表面に爆裂が生じ, 各々 25% と 16% の質量減少率を示したが, 有機繊維を 0.25vol% 混入した場合では全ての試験体で爆裂が生じなかった。

一方, 一つの繊維を混入した場合より二つの繊維を混合使用したコンクリートの方が爆裂防止に効果的であるという既往の報告¹³⁾のように, 本研究でも PP と NY 繊維をそれぞれ 0.15vol% を混合使用した場合, 爆裂防止効率が低いことが確認できた。



図－2 鉄筋コンクリート柱の作製詳細図



図－3 鉄筋コンクリート柱の加熱方法

3. RC 柱の耐火性能及び残存耐力評価

3.1 RC 柱の耐火性能評価の概要

1) RC 柱の作製

RC 柱の作製詳細図を図－2 に示す。RC 柱は断面 500×500mm, 高さ 3600mm で作製した。主筋 (直径 29mm, 引張強度 500MPa) は 15 個を配筋し, 帯筋 (直径 13mm, 引張強度 500MPa) は軸方向に 100mm ごとに配筋した。

コンクリートは 2 章で用いた調合のうち, 200MPa と同一なコンクリートを用いた。実験時にコンクリート圧縮強度は 207 MPa であり, NY 繊維 0.15%, PP 繊維 0.25% を混入した。RC 柱の設計耐力は 48,000kN とした。また, 加熱実験中に RC 柱の内部温度の上昇量を評価するため, 4 つの熱電対を柱の高さの中心に, 3 つの熱電対を主筋に設けて耐火性能を評価した。

2) RC 柱の耐火性能評価方法

載荷加熱装置は 30,000kN 級載荷装置に加熱炉を設けたものを用いた。RC 柱は加熱実験前に設計耐力の 25% (12,000kN) を載荷した状態で 1 日間据え置き, 図－3 のように ISO-834 標準加熱曲線を用いて, 3 時間加熱を行った。

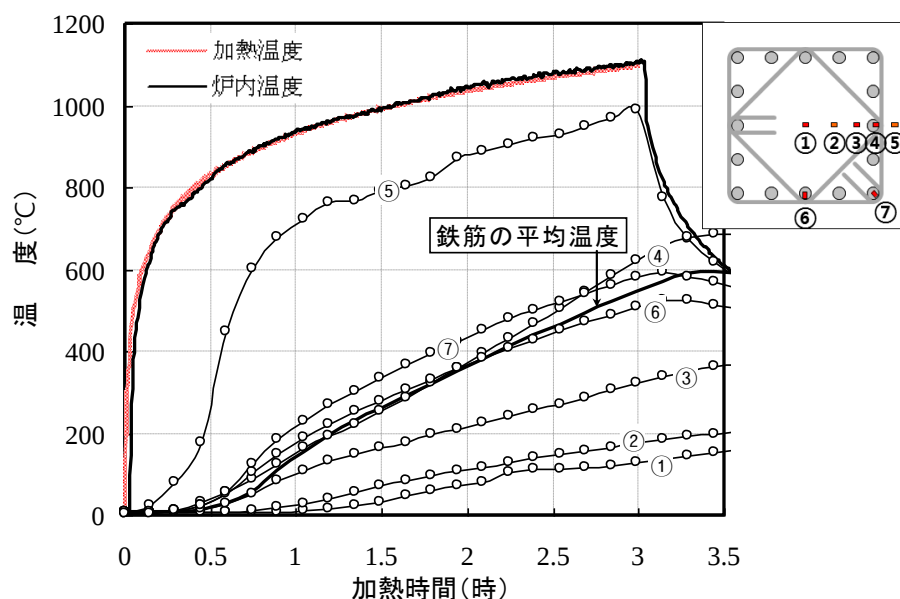


図-4 加熱時間と鉄筋コンクリート柱の内部温度の関係

表-4 柱の耐火性能に関する評価基準¹⁴⁻¹⁷⁾

試験項目	規格	耐火性能に関する評価基準
鉄筋温度	ISO ASTM KS	最高 649°C (1200°F) 平均 538°C (1000°F)
	JIS	最高 500°C 以下
軸方向 変形	ISO KS	最大方向収縮量 $h/100$ 最大方向収縮率 $3h/1000$
	ASTM BS	加熱中の試験荷重を支持していること

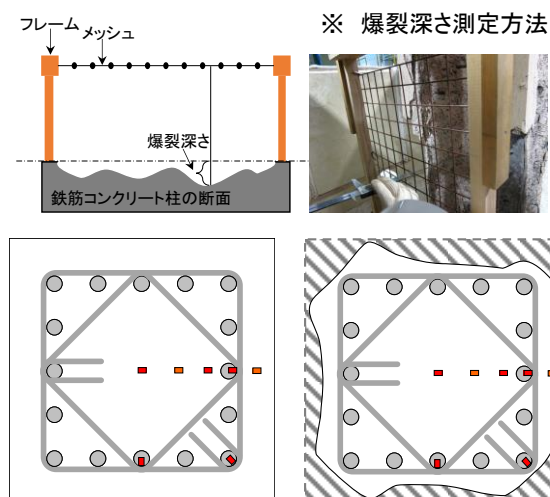
また、加熱実験終了後に 24 時間自然冷却して高温加熱を受けた柱の爆裂性状を確認した後、荷重載荷による残存耐力を評価した。RC 柱の耐火性能は表-4 のような基準に準じて評価した。

3.2 RC 柱の耐火実験結果及び考察

1) 内部温度上昇と爆裂特性

図-4 に ISO-834 標準加熱曲線による RC 柱の内部温度上昇を示す。表面部の加熱によって熱が柱の内部に伝導され、柱の中心に近いほど、温度が低いことを確認できる。特に、加熱時間 30 分にかぶりコンクリートの爆裂が生じて⑤熱電対温度が急に高くなる傾向が見られた。

主筋に設けた熱電対の温度を基準とし、許容温度制限による耐火性能を評価した結果、3 時間の加熱時間で ISO, KS, ASTM から提示されている最大許容温度 649°C (1200°F)、平均許容温度 538°C (1000°F) を超えない 3 時間の耐火性能を持っていることが確認できた。一方、JIS の許容温度基準 (500°C) による耐火性能は 2.3 時間



a) 加熱前(爆裂無) b) 加熱実験終了後
図-5 鉄筋コンクリート柱の爆裂性状

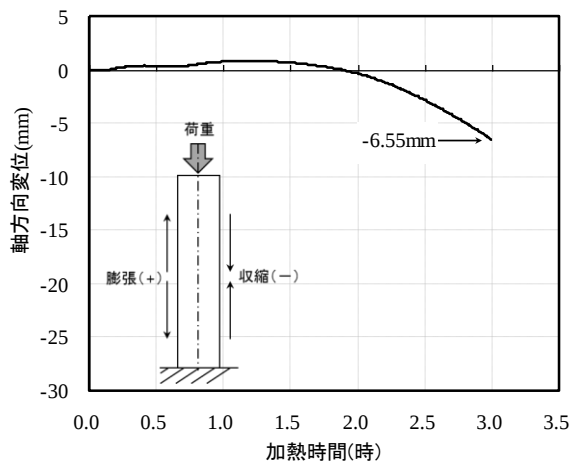


図-6 鉄筋コンクリート柱の軸方向変位

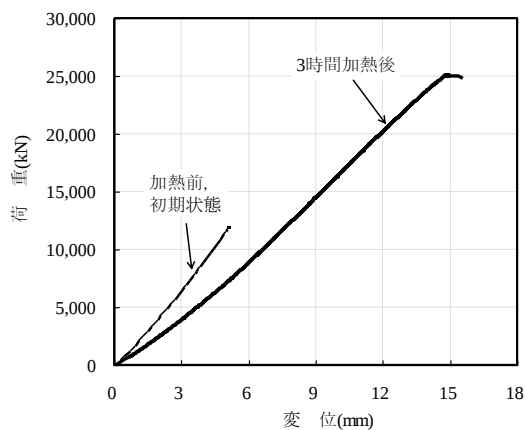


図-7 鉄筋コンクリート柱の荷重－変位曲線

と評価された。

加熱実験後の RC 柱の試験体状況を図-5 に示す。供試体を用いた爆裂特性試験（2 節）では有機繊維の混入によってコンクリートの爆裂が抑制されるが、RC 柱の実験では爆裂が発生した。

一方、図-5 のように RC 柱の表面から剥離された深さを測定し、爆裂発生後の断面を算定した。最大爆裂深さは RC 柱の角部に 98mm、平均爆裂深さは 36.85mm で、RC 柱の断面が約 26% 程度小さくなることが確認できた。

2) 軸方向変位

図-6 に加熱実験中に荷重載荷による RC 柱の軸方向変位を示す。これは加熱実験前の荷重による軸方向変位 5.22mm を除く、加熱実験間の変位を測定した結果である。RC 柱は加熱時間 1.2 時間まで膨張したが、その後では収縮する傾向が見られ、加熱時間 2 時間後では初期値の以下に収縮する結果が現れた。

3 時間の加熱時間で RC 柱の最大収縮量は 6.55mm で、KS と ISO から提示されている許容軸方向収縮量の算定

法によって求めた 36mm より非常に小さい収縮量を確認した。また、加熱実験中に載荷した荷重を堪えることから ASTM と BS の荷重支持能力も満たすことが確認できた。

従って、本研究で検討した 200MPa 級超高強度コンクリートの RC 柱は許容軸方向収縮量基準による 3 時間の耐火性能を満たすことが確認できた。

3) 3 時間の加熱を受ける RC 柱の残存耐力

加熱実験後、24 時間自然冷却し、RC 柱の残存耐力を評価した結果を図-7 に示す。加熱前の RC 柱の最大耐力（設計耐力：48,000 kN）は試験装置の容量（30,000 kN）の限界があり、測定できなかった。従って、加熱実験前の荷重－変位曲線は事前載荷によるものである。

荷重－変位曲線の傾きから高温を受けた RC 柱の剛性が低下し、3 時間の加熱を受けた RC 柱は 25,000kN（設計耐力の 52%）の残存耐力を持っていることが確認できた。

3.3 加熱時間による RC 柱の残存耐力の計算

火災加熱を受けた RC 柱の残存耐力の計算は Dotreppe の研究で提示している式（1）を用いた¹²⁾。

$$N_r = \beta_1(t)A_c f_c + \beta_2(t)A_s f_y \quad \text{式(1)}$$

ここで、 N_r ：鉄筋コンクリート柱の残存耐力(kN)

A_s ：鉄筋の面積(mm²)

f_c ：コンクリートの圧縮強度(MPa)

f_y ：鉄筋の降伏強度(MPa)

ここで、 $\beta_1(t)$ と $\beta_2(t)$ は各々のコンクリート部の強度減少係数と鉄筋の強度減少係数であり、これらは熱伝導解析から得られた温度と材料の強度減少係数を用いた式（2）により求めたものである。

$$\beta(t) = \frac{\sum A_i f_i(t)}{A f} \quad \text{式(2)}$$

ここで、 A_i コンクリート、鉄筋の微小面積

$f_i(t)$ 温度 t °C でコンクリート、鉄筋の強度

A コンクリート、鉄筋の面積

f 常温でコンクリート、鉄筋の強度

また、Dotreppe は加熱時間による計算結果から非線形回帰分析を行い、コンクリートの面積を定数とした式（3）と鉄筋のかぶり厚さを定数とした式（4）を提案した。

$$\beta_1(t) = \frac{1}{\sqrt{1 + (0.3A_c * t)^{A_c - 0.25}}} \quad \text{式(3)}$$

ここで、 $\beta_1(t)$ ：コンクリート部の強度減少係数

t ：加熱時間(時)

A_c ：コンクリートの面積(mm²)

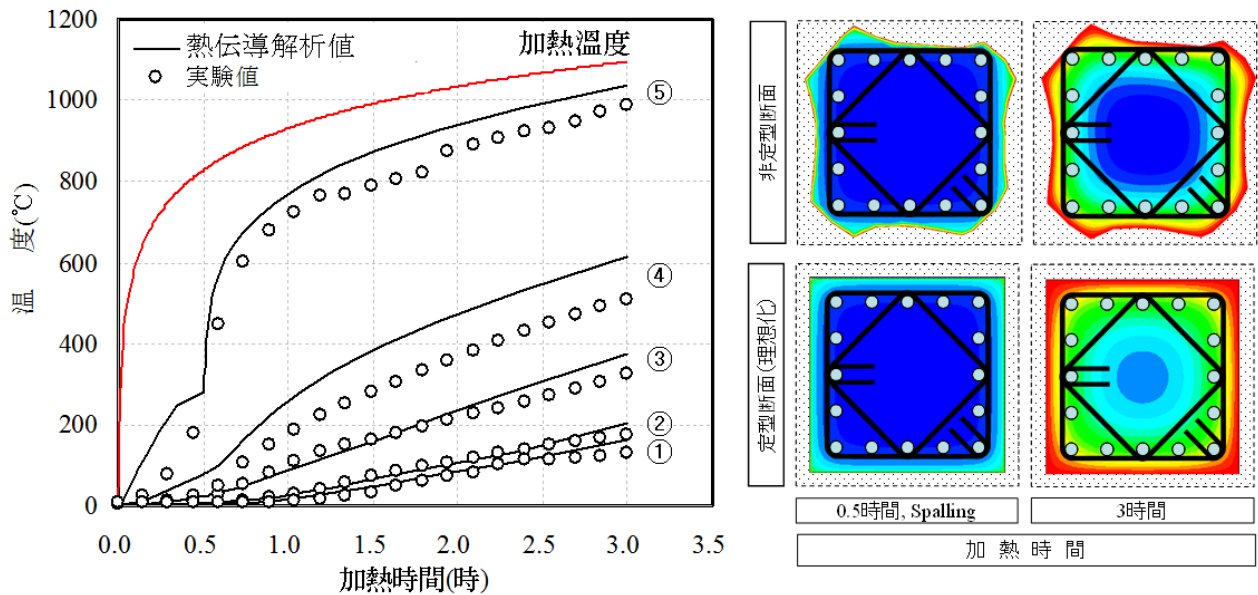


図-10 断面形態による鉄筋コンクリート柱の内部温度比較

$$\beta_2(t) = 1 - \frac{0.9t}{t_2} > 0 \quad \text{式(4)}$$

$$t_2 = 0.046(c) + 0.11$$

ここで、 $\beta_2(t)$ ：鉄筋の強度減少係数

c ：鉄筋のかぶり厚さ (mm)

しかし、この研究は 100MPa 以下のコンクリートを対象とした研究結果であり、超高強度コンクリートの場合の激しく生じる爆裂の影響は考慮されていないため、本研究では Dotreppe の提案式に超高強度コンクリートの爆裂特性と高温強度特性を適用するために熱伝導解析を行った。熱伝導解析は有限要素解析プログラム Midas FEA を用い、コンクリート材料の熱特性値は EN 1992-1-2:2004(E) で提案しているもの(含水率 3%)を適用した。

爆裂が生じた柱断面の熱伝導解析は加熱時間 30 分に平均爆裂深さを除いた縮小断面を用いた。コンクリートの爆裂を考慮した縮小断面の熱伝導解析値と加熱実験による柱の内部温度値を比較して図-10 に示す。熱伝導解析値と内部温度測定値は非常に同様なことから、超高強度コンクリートを用いた柱断面の熱伝導解析では平均爆裂深さを削除した縮小断面を用いることが有効であると判断される。

従って、本研究では Dotreppe から提案されている式(3)と式(4)を式(5)と式(6)のように修正し、適用した。

$$\beta_1(t) = \frac{1}{\sqrt{1 + (0.36A_c * t)^{A_c^{-0.255}}}} \quad \text{式(5)}$$

ここで、 $\beta_1(t)$ ：コンクリート部の強度減少係数

t ：加熱時間(時)

A_c ：コンクリートの面積(mm²)

$$\beta_2(t) = 1 - \frac{0.9t}{t_2} > 0 \quad \text{式(6)}$$

$$t_2 = 0.046(c - ds) + 0.11$$

ここで、 $\beta_2(t)$ ：鉄筋の強度減少係数

c ：鉄筋のかぶり厚さ (mm)

ds ：平均爆裂深(mm)

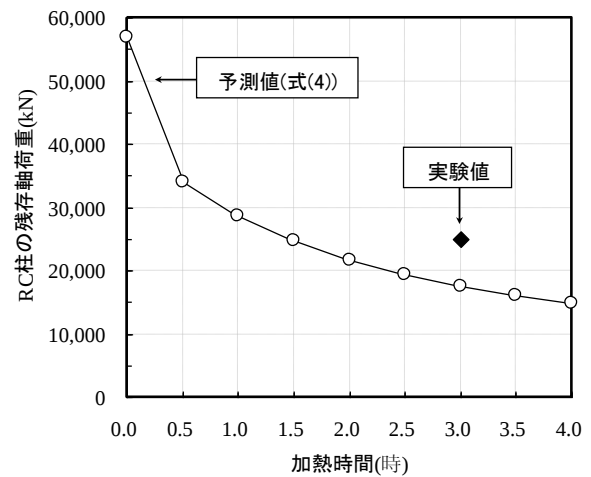


図-11 RC 柱残存軸荷予測値と実験値の比較

修正した $\beta_1(t)$ と $\beta_2(t)$ を用い、式(1)から求めた加熱時間による RC 柱の残存耐力の予測値と荷重載荷実験による実験値を図-11 に示す。加熱 3 時間で式(1)による残存耐力の計算値は 17,568kN となり、これは実際残存耐力(25,000kN)の 70%程度と予測された。

4. まとめ

200MPa 級超高強度コンクリートを用いた RC 柱の耐

火性能と残存耐力を評価した結果、以下の知見が得られた。

- 1) 超高強度コンクリートは供試体の加熱実験では有機繊維の混入によって爆裂が抑制されたが、RC 柱では爆裂が発生し、26%の断面損失が確認された。
- 2) 超高強度コンクリートを用いた RC 柱は爆裂が生じても 3 時間の加熱試験中で設計耐力の 25%荷重に耐え、荷重載荷実験による設計耐力の 52%程度残存することが確認できた。
- 3) 材料特性と爆裂特性を考慮し、超高強度コンクリートを用いた RC 柱の残存耐力を計算した結果、実際残存耐力の 70%程度と予測できた。これは、材料実験と部材実験間に生じる熱容量による差と考えられ、今後正確な予測のためにはこれらの現象について検討が必要であると考えられる。

謝辞

本研究は 2015 年度韓国政府(教育科学技術部)の財源による韓国研究財団の支援を受けて遂行された研究(NRF-2015R1A2A2A01007705)の支援を受けました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Hideki Kimura, Yuji Ishikawa, Atsushi Kambayashi and Hiroto Takatsu, Seismic behavior of 200MPa ultra high strength steel fiber reinforced concrete columns under varying axial load, Journal of advanced concrete technology, vol. 5, No. 2, pp.193~200.
- 2) K. Yamamoto, T. Nakajima, S. Watanabe, Y. Shimizu, High-rise building operations using ultra strength concrete with a design strength of 200MPa, concrete journal, vol. 49, No. 8, pp.37~42
- 3) Shinichi Koizumi, Takumi Sugamata and Yochihiro Masuda, The temperature dependency of the reaction of silica fume on strength development of 200N/mm²-class high strength concrete, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol. 76, 2011, No. 659. pp. 15~22
- 4) Kalifa P, Menneteau FD, Quenard D., Spalling and pore pressure in HPC at high temperatures, Cement and Concrete Research, Vol. 30, 2000, pp. 1915~1927
- 5) Phan, L.T, Carino, N.J., 'Mechanical Properties of High Strength Concrete at Elevated Temperatures', NISTIR 6726, Building and Fire Research Laboratory, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, March 2001.,
- 6) Phan, L.T.; Lawson, J.R.; Davis, F.R., 'Effects of elevated temperature exposure on heating characteristics, spalling, and residual properties of high performance concrete', RILEM Materials and Structures Journal, v. 34 (236) (March 2001) 83-91.) (February, 1998) 58-64.
- 7) Phan, L.T.; (2002) High-strength concrete at high temperature—an overview. In: König G, Dehn F, Faust T (eds) Utilization of high strength/high performance concrete, 6th international symposium. Proceedings, vol 1. June 2002, Leipzig, Germany, pp 501–518
- 8) 崔景喆, 金圭庸, Nenad Gucunski, 金武漢: 高温加熱と荷重条件による超高強度コンクリートの力学的特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No. 1, pp. 1324-1329, 2014
- 9) Kenro MITSUI, Toshio YONEZAWA, Masaro KOJIMA, Hirozo MIHASHI, Effect of incorporating organic and steel fiber on fire resistance of 80 to 200N/mm² high strength concrete columns, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol. 75, 2010, No. 648, PP. 461-468
- 10) Comité Européen de Normalisation, 'ENV 1992-1-2: Eurocode 2: Design of Concrete Structures. Part 1 - 2: Structural Fire Design', CEN/TC 250/SC 2 (1993).
- 11) Phan, L.T, and Carino, N.J., 'Review of mechanical properties of HSC at elevated temperature', Journal of Materials in Civil Engineering, American Society of Civil Engineers, v. 11 (1),
- 12) J.-C. Dotreppe, J.-M. Franssen, and Y. Vanderzeypen, Calculation Method for Design of Reinforced Concrete Columns Under Fire Conditions, ACI Structural Journal, vol. 96, no. 1, 1999, pp. 9–18.
- 13) Abe, T., Furumura, F., Tomatsuri, K., Kuroha, K. and Kokubo, I., Mechanical Properties of High Strength Concrete at High Temperatures, Journal of Structural and Construction Engineering. Transactions of AIJ, No.515, pp. 163-168, 1999 (in Japanese)
- 14) ACI Committee 363. State-of-the art report on high strength concrete (ACI 363R-92). Farmington Hills, MI: American Concrete Institute; 1992.
- 15) KS F 2257-1 : Methods of Fire-Resistant Testing for Structural Element—General Requirements. Korean Standards Association, Korean Industrial Standards; 1999
- 16) JIS, A. 1304. Method of fire resistance test for structural parts of buildings, 1994
- 17) ISO 834: Fire resistance tests—elements of building construction. Geneva, Switzerland: International Standards Organization; 1999.