

# 論文 コンクリートの爆裂深さの予測式の提案

大山 理<sup>\*1</sup>・栗田 章光<sup>\*2</sup>

**要旨:** 本研究では、コンクリート橋が火災による熱の影響を受けた際、その被災度を明らかにするために、コンクリートの圧縮強度と含水率をパラメータとした供試体を用いて、ヨーロッパの設計規準であるユーロコードに規定されている炭化水素曲線(HC曲線)に基づき、90分間の加熱試験を実施した。その結果、加熱開始2分後から、コンクリートの圧縮強度が40N/mm<sup>2</sup>以上、含水率の値が4.0%以上の供試体に爆裂現象が見られ、一部の供試体は、鉄筋の露出が確認された。また、測定結果に基づき、含水率から最大および平均の爆裂深さを予測する式の提案を行った。そして、最後に、各爆裂深さにおける鉄筋の受熱温度の推定を行った。

**キーワード:** 火災, 爆裂, 圧縮強度, 含水率, 炭化水素曲線

## 1. はじめに

コンクリート構造物では、周知のとおり、高温な加熱を受けた場合、コンクリートの表層部分が破裂音を伴い飛散・剥離する爆裂現象<sup>1),2)</sup>が起きることが大きな問題として挙げられる。それは、爆裂によりコンクリート断面が大きく欠損すると、露出した鉄筋が直接炎に曝され、その結果、鉄筋の強度が大幅に低下し、最終的には、構造物として機能し得なくなる危険性があるからである。

そこで、土木分野において、これまでに大きな火災事故が多発したトンネルを対象に、コンクリートの耐火対策に関する研究が精力的に行われ、最近では、爆裂の発生要因の1つとして考えられている水蒸気圧を外に逃がすために、高温で溶ける有機繊維をコンクリート内に混入する工法やセラミックボードなどの耐火板を構造本体に取り付ける工法<sup>3)</sup>が注目されている。

一方、近年、桁下でタンクローリーなどが横転・炎上することによる火災、不審火ならびに放火などが原因で、一般橋梁や高架橋が大きな被害を受ける事例が数多く報告されている<sup>4)</sup>。例えば、2006年12月末、資材置き場からの出火により、一般国道1号守口高架橋(単純PCプレテンション桁橋)が損傷を受けた<sup>5)</sup>。この火災により、上部工のコンクリートには、爆裂、ひび割れならびに浮きの発生が見られた。また、コンクリートの一部がピンク色に変色していたことから、火災による受熱温度が300~600℃と想定され、PC鋼材の強度低下やプレストレスの損失などにより、本高架橋の耐荷性状の低下が懸念された。そこで、補修が完了するまでの約7ヶ月間、大幅な車線規制が行われ、その間の規制によって、現場周辺の交通に悪影響を与えた。

このように、一般橋梁や高架橋が火災を受けると、最悪の場合、落橋も考えられ、落橋に至らない場合でも、調査や補修などによる長期間の交通規制が必要となる。

表-1 実験供試体の種類

(a) 水セメント比

	Type-A	Type-B	Type-C	Type-D
水セメント比 (W/C)	53.3%	41.0%	36.0%	31.0%
設計基準強度 [N/mm <sup>2</sup> ]	24.0	40.0	60.0	70.0

(b) 含水率

	CASE-1	CASE-2	CASE-3
含水率	4.0%以上	4.0%程度	4.0%以下

すなわち、被災した橋梁の損傷状況や安全性を迅速かつ適確に判断することが重要となるが、今日まで、トンネルに比べ、橋梁に対する耐火性能の評価法は確立されていないのが現状である。

そこで、本研究では、コンクリート橋が火災による熱の影響を受けた際、その被災度を明らかにする第一段階として、爆裂の発生に大きな影響を及ぼすと考えられている要因の内、コンクリートの圧縮強度と含水率に着目し、その両者をパラメータとして製作した供試体の加熱試験を実施した。そして、各コンクリートの圧縮強度において、熱の影響を受けた際のコンクリート橋の状態(含水率)から最大および平均の爆裂深さを予測する式の提案を行う。さらに、被災度を推定する一例として、爆裂によりコンクリート断面が欠損したとことによる鉄筋の受熱温度の推定を行う。

## 2. 加熱試験の概要

### 2.1 供試体

まず、実験供試体の種類を表-1に示す。本加熱試験

\*1 大阪工業大学 工学部都市デザイン工学科准教授 博士(工学) (正会員)

\*2 大阪工業大学 工学部都市デザイン工学科特任教授 博士(工学) (正会員)

表-2 コンクリートの示方配合

	配合の種類	W/C [%]	s/a [%]	単位量 [kg/m <sup>3</sup> ]				単位量 [kg/m <sup>3</sup> ]	
				C	W	S	G	AD	AE
Type-A	24N-12-20H	53.3	44.5	300	160	827	1030	1200	—
Type-B	40N-12-20H	41.0	44.5	366	150	805	1023	2123	0.9
Type-C	60N-15-20H	36.0	45.0	442	159	785	957	2321	5.5
Type-D	70N-18-20H	31.0	46.0	500	155	814	954	3750	—

(C:セメント, W:練混ぜ水, S:細骨材, G:粗骨材, AD:混和剤(減水剤), AE:混和剤(AE剤))

表-3 使用材料

材料名	商品名および品質	材料名	商品名および品質
セメント	早強ポルトランドセメント (密度: 3.13g/cm <sup>3</sup> )	粗骨材	砕砂 (密度: 2.66g/cm <sup>3</sup> )
練混ぜ水	JIS A 5308 付属書 9 に適合	混和剤(減水剤)	レボルト <sup>®</sup> 8000S, 高性能減水剤(I種)
細骨材	砕砂 (密度: 2.66g/cm <sup>3</sup> )	混和剤(AE剤)	マイクロア 202, AE剤(I種)

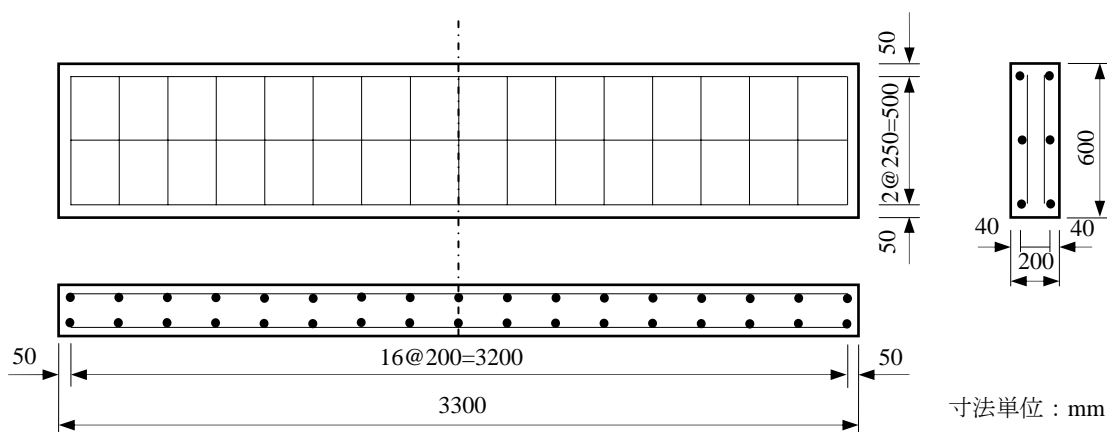


図-1 供試体の寸法



写真-1 円柱テストピースの乾燥状況

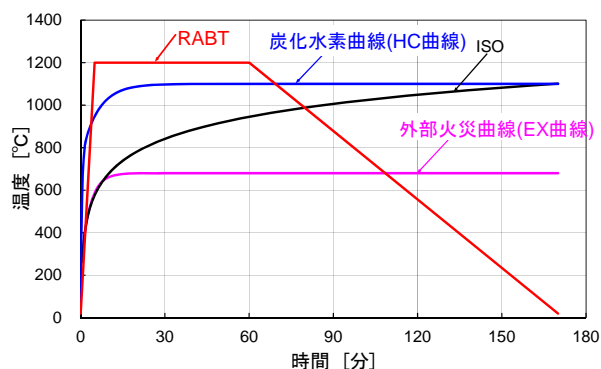


図-2 火災温度-時間関係

は、4種類のコンクリートの圧縮強度と3種類の含水率をパラメータとした。ここで、3種類の含水率の値は、実橋において、CASE-1は降雨時や湿度が高い状態を、CASE-2は通常時を、CASE-3は乾燥時を、それぞれ、想定したものである。そのため、各供試体は、型枠脱型後、含水率4.0%以上のCASE-1は水中に、含水率が4.0%およびそれ以下のCASE-2およびCASE-3は屋外に放置した。コンクリートの含水率は、これらと同じ環境条件下にある円柱テストピース(φ100×200)が、本実験におい

ては、供試体と同等であると仮定し、さらに、水中に養生したCASE-1の円柱テストピースは、乾燥開始直前まで、表面が濡れた状態で、写真-1に示す乾燥炉に入れ、乾燥前と質量の変化が見られなくなるまで乾燥させたテストピースの質量の差から算出した。

つぎに、各Typeのコンクリートの示方配合および使用材料を、それぞれ、表-2および表-3に、実験供試体の寸法を図-1に示す。ここで、実験供試体のかぶりは40mm、配置する鉄筋は、すべてD16である。

表-4 コンクリートの圧縮強度

	Type-A	Type-B	Type-C	Type-D
水セメント比 (W/C)	53.3%	41.0%	36.0%	31.0%
設計基準強度 [N/mm <sup>2</sup> ]	24.0	40.0	60.0	70.0
CASE-1 [N/mm <sup>2</sup> ]	39.8	54.4	56.9	77.0
CASE-2 [N/mm <sup>2</sup> ]	39.5	52.6	52.5	71.5
CASE-3 [N/mm <sup>2</sup> ]	44.0	57.8	58.2	79.3

表-5 コンクリートの含水率

	Type-A	Type-B	Type-C	Type-D
CASE-1 [%]	6.0	5.2	5.5	5.2
CASE-2 [%]	3.8	4.0	4.3	4.3
CASE-3 [%]	3.4	3.3	3.9	4.0

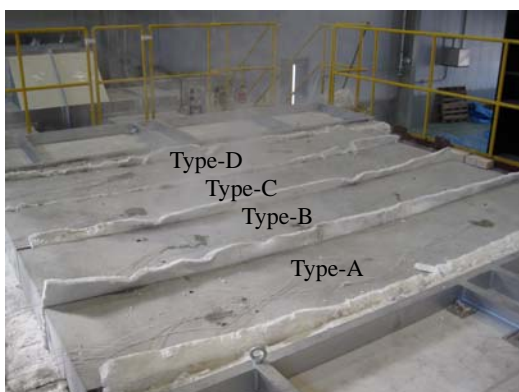


写真-2 加熱実験の状況

## 2.2 火災温度-時間関係

図-2 にヨーロッパの設計規準であるユーロコード<sup>6)</sup>に規定されているISO, 炭化水素曲線(HC曲線)ならびに外部火災曲線(EX曲線)とドイツのトンネル火災を想定したRABT曲線の火災温度-時間関係をまとめて示す。

本加熱試験には、桁下でタンクローリーが横転・炎上したという前提条件で、油火災を想定した炭化水素曲線(以下、HC曲線と略記)を適用した。また、加熱時間は、首都高速道路の火災事例を参考に90分間とした<sup>7)</sup>。

## 3. 加熱試験の結果

加熱試験前日におけるコンクリートの圧縮強度(3本の円柱テストピースの平均値)および含水率の測定値を、それぞれ、表-4 および表-5 に示す。なお、加熱試験は、コンクリート打ち込み後、CASE-1 で 84 日後、

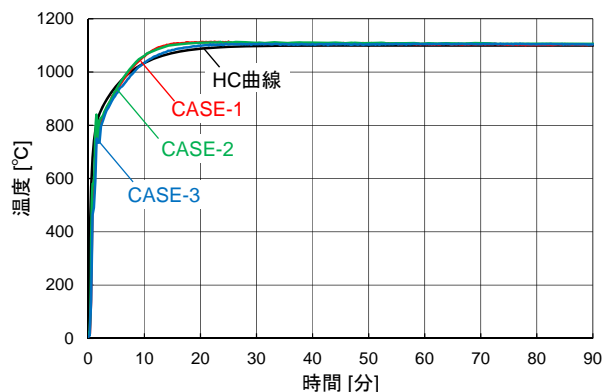


図-3 加熱温度の測定結果

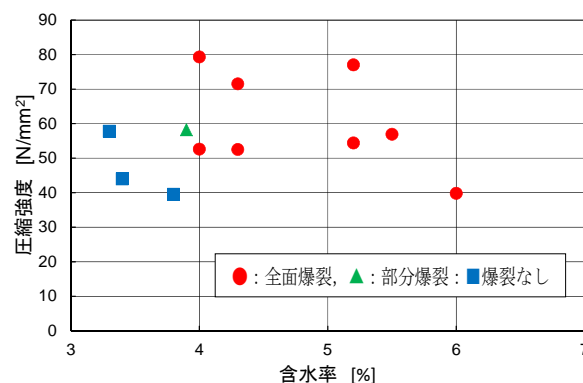


図-4 爆裂発生の有無

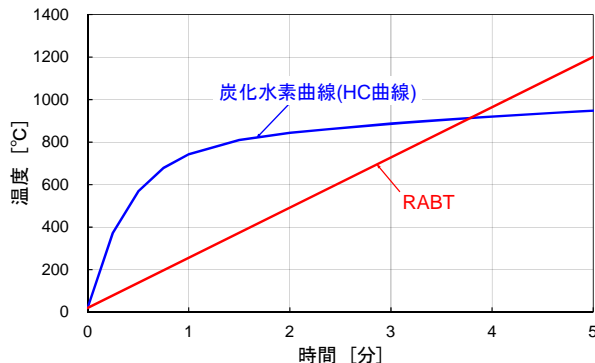


図-5 初期の火災温度-時間関係

CASE-2 で 50 日後、CASE-3 で 133 日後に、それぞれ実施した。表-4 より、今回、Type-C におけるコンクリートの圧縮強度は、設計基準強度以下となり、Type-B の圧縮強度と差異が見られない結果となった。

加熱試験は、写真-2 に示すとおり、各 CASE において Type-A から Type-D の供試体を大型水平加熱炉に並べ行った。

まず、各 CASE における加熱温度の測定結果を図-3 に示す。同図より、各 CASE において、加熱温度は、HC 曲線に沿って、精度良く、加熱できていることがわかる。

つぎに、縦軸をコンクリートの圧縮強度、横軸を含水率とし、加熱面のほぼ全面に爆裂が確認されたものは赤丸、部分的に爆裂が確認されたものは緑三角、さらに、



(a) Type-A (CASE-1)



(b) Type-D (CASE-3)

写真-3 爆裂状況

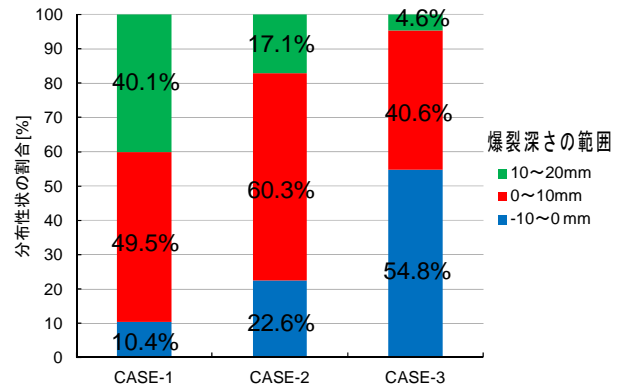
表-6 爆裂深さの最大値と平均値

	Type-A (W/C=53.3%)	Type-B (W/C=41.0%)	Type-C (W/C=36.0%)	Type-D (W/C=31.0%)
CASE-1 [mm]	19 (5.3)	21 (8.1)	29 (7.0)	37 (10.1)
CASE-2 [mm]	×	20 (3.1)	21 (6.3)	30 (10.1)
CASE-3 [mm]	×	×	21 (2.3)	33 (8.1)

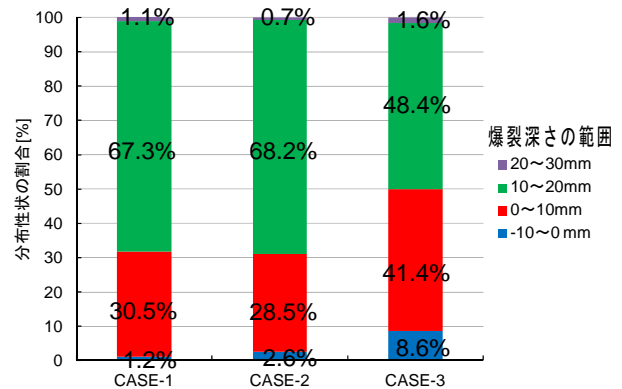
×：爆裂せず，( )：平均爆裂深さ

軽微な表面の浮きや剥離程度で、爆裂が確認されなかったものは青四角で、それぞれ図-4 にまとめて示す。図-4 より、本加熱試験では、コンクリートの圧縮強度が  $40\text{N/mm}^2$  以上で、かつ含水率が  $4.0\%$  以上であれば、爆裂が生じることが確認された。

また、本加熱試験における爆裂の開始および終了は、それぞれ、加熱開始後 2~3 分および 10 分であり、それ



(a) Type-C



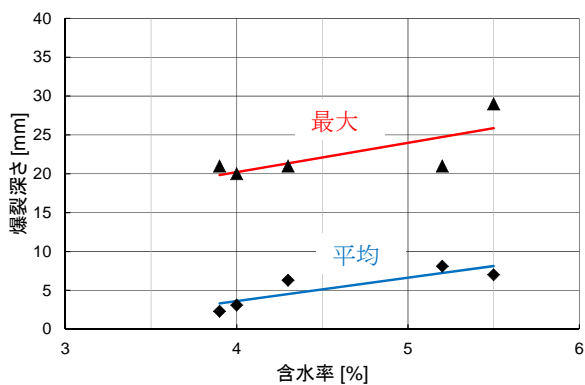
(b) Type-D

図-6 爆裂深さの範囲が占める割合

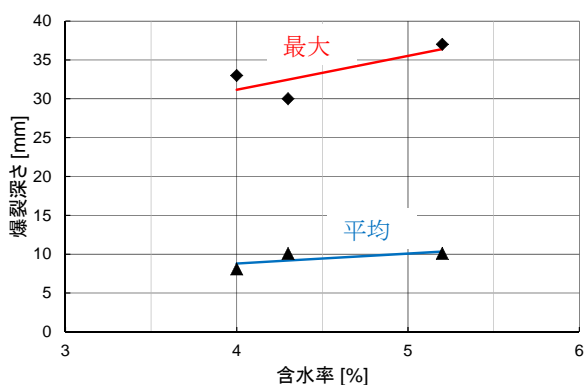
以降の爆裂現象は見られなかった。文献 8)では、RABT 曲線を適用し、コンクリートの圧縮強度  $74\text{N/mm}^2$ 、含水率  $5\%$  の供試体の加熱試験が行われ、加熱開始 4 分で爆裂が開始し、12 分後に終了したとの報告がある。本試験結果と爆裂開始時間に差異が見られるのは、図-5 に示すとおり、加熱開始直後は、HC 曲線の単位時間あたりの加熱温度の上昇速度、つまり、加熱速度が、RABT 曲線より高いことが要因と考えられる。したがって、爆裂の開始は、初期の加熱速度の影響が大きく関与していることがわかった。

ここで、一例として、コンクリートの圧縮強度が低く、含水率が高いCASE-1のType-Aおよびコンクリートの圧縮強度が高く、含水率が低いCASE-3のType-Dの爆裂状況を写真-3 に示す。また、供試体下面を幅方向に  $100\text{mm}$  間隔で、長さ方向に  $200\text{mm}$  間隔で分割し、加熱面に引いた水糸からスケールを用いて、全部で 105 箇所の爆裂深さの測定を行った。その深さの最大値と平均値を表-6 にまとめて示す。さらに、すべてのCASEにおいて爆裂現象が確認されたType-CおよびType-Dの加熱面積に対して、各爆裂深さの範囲が占める割合を図-6 にまとめて示す。なお、同図の青色、つまり、凡例の  $-10\sim 0\text{mm}$  は、コンクリートが爆裂せず、浮いていることを意味している。

写真-3 および表-6 より、コンクリートの圧縮強度



(a) 圧縮強度：50N/mm<sup>2</sup>～60N/mm<sup>2</sup> 台



(b) 圧縮強度：70N/mm<sup>2</sup> 台

図-7 爆裂深さの予測式

の値が高くなるほど、爆裂の性状は顕著になり、鉄筋が露出する状況が確認された。

図-6より、Type-Cの場合、コンクリートの含水率が5.5%のCASE-1は、加熱面の約9割が爆裂により欠損し、その深さの占める割合は、1cmまでが49.5%、1cm以上2cm以下が40.1%であった。しかし、含水率の値が低くなるほど、その割合が徐々に小さくなり、含水率が3.9%の場合、加熱面の45%にしか爆裂現象が見られなかった。一方、コンクリートの圧縮強度が70N/mm<sup>2</sup>を超えるType-Dの場合、含水率が5.2%のCASE-1と4.3%のCASE-2の加熱面積に対して各爆裂深さの範囲が占める割合は、ほぼ同じになることがわかった。

#### 4. 爆裂深さの予測式の提案

ここでは、コンクリート橋が火災による熱の影響を受けた際、爆裂による影響を把握するために、爆裂が2ケース以上確認されているType-B、Type-CならびにType-Dのコンクリートの含水率( $\rho$ )から最大爆裂深さ( $d_{max}$ )および平均爆裂深さ( $d_{av}$ )の予測式を提案する。なお、表-4より、Type-BおよびType-Cのコンクリートの圧縮強度の値に差異が見られなかったため、1つにまとめて予測式の提案を行う。

図-7(a)および(b)に、それぞれ、コンクリートの圧縮

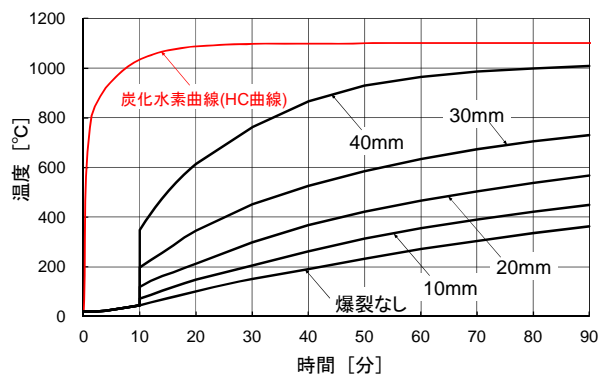


図-8 各爆裂深さにおける鉄筋の受熱温度

強度が50N/mm<sup>2</sup>～60N/mm<sup>2</sup>台であるType-BおよびType-C、70N/mm<sup>2</sup>台であるType-Dの各含水率に対する最大および平均爆裂深さを表記するとともに、予測式を含水率の1次関数と仮定し、最小二乗法より評価した結果を以下に示す。

圧縮強度：50N/mm<sup>2</sup>～60N/mm<sup>2</sup>台(適用範囲：3.9 ≤  $\rho$  ≤ 5.5)

$$\text{最大： } d_{\max, \sigma=50} = 3.77\rho + 5.15 \quad (1)$$

$$\text{平均： } d_{\text{av}, \sigma=50} = 3.00\rho - 8.41 \quad (2)$$

圧縮強度：70N/mm<sup>2</sup>台(適用範囲：4.0 ≤  $\rho$  ≤ 5.2)

$$\text{最大： } d_{\max, \sigma=70} = 4.36\rho + 13.7 \quad (3)$$

$$\text{平均： } d_{\text{av}, \sigma=70} = 1.28\rho + 3.66 \quad (4)$$

ここで、 $\rho$ ：コンクリートの含水率 [%]

コンクリートの圧縮強度が50～60N/mm<sup>2</sup>台および70N/mm<sup>2</sup>台の平均爆裂深さの予測式における相関係数は、それぞれ、0.863および0.693となり、比較的良く近似できていると考えられる。

#### 5. 各爆裂深さに対する鉄筋の受熱温度の推定

ここでは、コンクリート橋が火災による熱の影響を受けた際、瞬時に通行可否を判定するための一指標として、熱伝導解析を実施し、爆裂により断面が欠損した場合の引張側鉄筋の受熱温度の推定を行う。

対象は、コンクリート厚200mm、かぶり40mm、D16の鉄筋を有する部材で、HC曲線を適用し、実際は、爆裂に伴い、徐々に断面が欠損するが、解析上、加熱開始10分後、爆裂により断面が10mm、20mm、30mmならびに40mm(均一)欠損すると仮定した場合の鉄筋の受熱温度を熱伝導解析より算出し、その結果を図-8に示す。なお、熱伝導解析を行う際、コンクリートの密度、熱伝導率ならびに比熱の値は、ユーロコード第2編：コンク

リート構造物編に準拠<sup>9)</sup>し、含水率の値は、一例として、4.0%とした。

図-8より、加熱開始90分後、コンクリート断面が爆裂しないと仮定した場合の鉄筋の受熱温度は、362.5°Cとなった。一方、均一の爆裂深さが10mm、20mm、30mmならびに40mmの場合の鉄筋の受熱温度は、それぞれ、450.1°C、567.9°C、729.4°Cならびに1009.7°Cとなった。文献1)より、鉄筋は、400°Cで降伏強度の低下が始まり、600°Cおよび800°Cで、それぞれ、常温時の約60%および約10%に低下することから、安全性の照査を行う際、留意する必要がある。

## 6. まとめ

本研究では、コンクリート橋が火災による熱の影響を受けた際、その被災度を明らかにする第一段階として、コンクリートの圧縮強度と含水率に着目し、その両者をパラメータとした供試体を対象に、ユーロコードに規定されている油火災を想定した炭化水素曲線に基づき、90分間の加熱試験を実施し、種々の検討を行った。

本研究から得られた知見は、以下のとおりである。

- (1) HC 曲線を適用した本加熱試験より、部材厚が200mmの場合、コンクリートの圧縮強度および含水率が、それぞれ、40N/mm<sup>2</sup>以上および4.0%以上で、爆裂現象が確認された。また、コンクリートの圧縮強度の値が高くなるほど、爆裂の性状は顕著になり、鉄筋の露出が確認された。
- (2) 爆裂は、既往の研究のRABT曲線を適用した加熱試験よりも早く開始した。それは、HC曲線の初期の加熱速度がRABT曲線よりも早いためであると考えられる。
- (3) 爆裂により欠損する深さの分布性状を把握するとともに、含水率の値が低くなるほど、爆裂により欠損する範囲(面積)の割合が小さくなることがわかった。なお、70N/mm<sup>2</sup>台の高強度コンクリートで含水率の値が4.0%以上の場合、爆裂深さの分布性状は、ほぼ同じになることがわかった。

また、各コンクリートの圧縮強度において、含水率から爆裂深さを予測する式の提案を行った。そして、最後に、爆裂深さが10mm、20mm、30mmならびに40mm生じた場合の鉄筋の受熱温度の算定を行った。

以上より、コンクリート橋が火災による熱の影響を受けた際の状態(含水率)より、コンクリートの圧縮強度に応じて爆裂深さの予測式を提案するとともに、その深さから、鉄筋の受熱温度、つまり、降伏強度の低下の度合

を推定する一資料を提示した。

なお、本文では、限られた供試体数の加熱試験の結果に基づいて、爆裂深さを予測する式の提案を行っている。したがって、今後、さらに加熱試験を実施し、データを蓄積するとともに予測式の適用範囲の拡大ならびに精度の向上を図る必要がある。また、爆裂の発生要因は、コンクリートの圧縮強度や含水率以外に、部材への応力状態なども挙げられる。そこで、部材にプレストレスを与えた供試体の加熱実験を行い、爆裂深さの予測式の提案も行う予定である。

## 謝辞

本研究を遂行するにあたっては、大学院博士前期課程の長谷亮介氏を始めとする橋梁工学研究室に在籍された卒業研究生諸氏から多大なる協力を得たことを記し、ここに深く謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート構造物の耐火技術研究小委員会報告ならびにシンポジウム論文集、コンクリート技術シリーズ、No.63、2004.10
- 2) 森田 武：コンクリートの爆裂とその防止対策、コンクリート工学、Vol.45、No.9、pp.87-91、2007.9
- 3) 清宮 理：耐火技術とコンクリート—土木—、コンクリート工学、Vol.45、No.9、pp.8-13、2007.9
- 4) 例えば、大山 理、今川雄亮、栗田章光：火災による橋梁の損傷事例、橋梁と基礎、Vol. 42、No.10、建設図書、pp.35-39、2008.10
- 5) 田崎祥二：一般国道1号守口高架橋火災被災復旧の取り組みについて～供用中のPCT桁橋における復旧工法の検討事例～、国土交通省国土技術研究会報告2007、pp.33-36、2007.10
- 6) CEN：Eurocode 1：Actions on structures-Part 1-2：General actions-Actions on structures exposed to fire、EN 1991-1-2、Nov. 2002
- 7) 桑野忠生、鈴木寛久、増井 隆、依田勝雄：タンクローリー火災事故により損傷を受けた橋梁の復旧—首都高速5号池袋線復旧の設計と施工—、橋梁と基礎、Vol.43、No.4、pp.13-18、建設図書、2009.4
- 8) 田嶋仁志、岸田政彦、神田 亨、森田 武：火災高温時におけるシールドトンネルRC覆工断面の変形挙動解析、土木学会論文集 E、Vol.62、No.3、pp.606-618、2006
- 9) CEN：Eurocode 2：Design of concrete structures-Part 1-2：General actions-structural fire design、prEN 1992-1-2、Oct. 2002