

# 報告 火害を受けたコンクリートの劣化範囲の推定方法

川西 貴士<sup>\*1</sup>・近松 竜一<sup>\*2</sup>・屋代 勉<sup>\*3</sup>・香川 敦<sup>\*4</sup>

**要旨:** トンネル内の車両火災などにより火害を受けたコンクリートの補修を行う場合、加熱面からの深さ方向の劣化範囲を推定する必要がある。そこで、トンネル火災を想定した RABT 曲線による加熱履歴を与えた試験体からコアを採取し、各種測定方法により劣化範囲の推定を行った。その結果、圧縮強度、反発硬度、ピッカース硬さおよび超音波伝播速度の測定により、火害を受けたコンクリートの劣化深さの範囲を推定できること、圧縮ひずみの画像解析により、劣化深さの範囲を特定し、その分布図を作成できることが明らかになった。

**キーワード:** 火害, 劣化, コア, 圧縮強度, 反発硬度, 画像解析, RABT 曲線

## 1. はじめに

都市部の地下に構築される道路用のシールドトンネルは、車両事故などにより火災が発生した場合にトンネルの崩壊や避難の妨げとならないよう耐火性が求められる。トンネル内の覆工コンクリートを火災から保護するため、従来は耐火板や耐火材の吹付けなどが施されてきたが、近年においては、ポリプロピレン短繊維を混入することで、トンネルの覆工コンクリート自体に耐火性を付与する事例も増えている<sup>1), 2)</sup>。

万一火害を受けた場合には、耐火被覆を施すのであれば、その被覆材の交換が可能であるが、覆工コンクリート自体に耐火性を付与させるのであれば、コンクリートの強度や耐久性が低下した劣化部を除去し、補修する必要がある。このためには、火害によるコンクリートの劣化範囲とその程度を事前に推定する必要がある。

劣化範囲の推定方法には、変色状況の目視観察、中性化深さやシュミットハンマーによる反発度の測定、各種力学試験および化学分析など、多数の手法が提案されている<sup>1), 2)</sup>。しかし、中性化深さやシュミットハンマーによる反発度の測定方法では、深さ方向の劣化の分布を測定することが困難であり、化学分析による方法は、時間と労力を要するなど、それぞれに課題がある。

本稿では、火害を受けたコンクリートの深さ方向の劣化範囲を簡易に推定するために、小型の測定器を用いた反発硬度の測定、画像解析による圧縮ひずみの測定などの方法を対象に、それらの実用性を実験的に検証した結果について報告する。また、従来から提案されている中性化深さおよび化学分析による水和物の特定、圧縮強度、ピッカース硬さおよび超音波伝播速度の測定も併せて実施し、これらの結果を比較した。

## 2. 実験概要

### 2.1 実験ケースおよび測定方法の概要

劣化の範囲を推定するための方法として、目視確認や既往の測定方法も含めて9種類の実験を行った。測定方法の一覧を表-1に示す。実験には、水結合材比や粉体の組合せの異なる4種類の配合を使用した。実験ケースおよび測定方法の組合せを表-2に示す。

RABT 曲線による加熱履歴を与えた試験体（以下、試験体と呼称）からコアを採取し、各種測定方法により、劣化範囲を推定した。各測定方法の概要を以下に示す。

#### (1) 目視観察

加熱後、試験体の表面や、採取したコアの表面の目視観察を行い、コンクリートの変色状況から受熱温度の推定した。

#### (2) 中性化深さの測定

試験体より直径 100mm のコアを乾式で採取した後、断面を半分に分けて、その割裂面にフェノールフタレイン溶液を噴霧し、赤紫色を呈していない部分の長さを測定した。試験は、JIS A 1152「コンクリートの中性化深さの測定方法」に準拠して実施した。

表-1 測定方法の一覧

No.	分類	測定方法
(1)	変色状況から受熱温度を推定	目視観察
(2)		中性化深さの測定
(3)	水酸化カルシウムの変質した領域を判定する方法	示差熱質量分析
(4)		X線回折
(5)		圧縮強度の測定
(6)	直接的にコンクリートの硬さを測定する方法	反発硬度の測定
(7)		ピッカース硬さの測定
(8)	ひび割れの状況から判定する方法	超音波伝播速度の測定
(9)	弾性係数の分布から測定する方法	画像解析による圧縮ひずみ分布の測定

\*1 (株)大林組 技術研究所生産技術研究部副課長 工修 (正会員)

\*2 (株)大林組 技術研究所生産技術研究部副部長 工博 (正会員)

\*3 (株)大林組 土木本部生産技術本部シールド技術部副課長 工修 (非会員)

\*4 (株)大林組 土木本部生産技術本部シールド技術部課長 工修 (非会員)

表-2 実験ケースおよび測定方法の組合せ

配合のケースNo.	コンクリートの種類および配合条件					測定方法の種類								
	水結合材比 (%)	結合材の組合せ※1	PP繊維の種類※2	PP繊維の混入率 (容積%)	耐火試験時の圧縮強度 (%)	(1) 目視観察	(2) 中性化深さの測定	(3) 示差熱熱重量分析	(4) X線回折	(5) 圧縮強度の測定	(6) 反発硬度の測定	(7) ビッカース硬さの測定	(8) 超音波伝播速度の測定	(9) 画像解析による圧縮ひずみの測定
Case1	42.7	C+LP	PP①	0.1	61.7	○	-	○	○	-	-	-	-	-
Case2	36.0	C	PP②	0.2	66.6	○	-	-	-	-	-	○	○	-
Case3	35.0	C	PP①	0.1	73.9	○	○	-	-	○	○	-	-	○
Case4	31.0	C+BS	PP②	0.2	68.9	○	○	○	○	○	○	○	○	-

※1 C: 普通ポルトランドセメント, BS: 高炉スラグ微粉末, LP: 石灰石微粉末  
 ※2 PP①: 繊維17dtex×長さ20mm, PP②: 繊維2.2dtex×長さ10mm  
 ※3 Case1およびCase4については鋼繊維(直径0.6mm×長さ30mm)を混入

(3)示差熱質量分析

試験体より直径 100mm のコアを乾式で採取した後、所定の深さごとにコアを切断して作製した試験片を粉碎して試料を作製し、示差熱質量分析を行った。質量減少率と吸発熱変化を測定し、Ca(OH)<sub>2</sub>およびCaCO<sub>3</sub>の含有率の測定を行った。試験は、加熱面から 10mm, 50mm, 70mm, 100mm および 150mm について行い、Case4 については 30mm の深さも実施した。

(4)X 線回折

(3)項と同様に、直径 100mm のコアから粉碎試料を作製し、X 線回折による分析を行った。X 線回折では、X 線の回折角度から Ca(OH)<sub>2</sub>と CaCO<sub>3</sub>の有無を調査した。試料は、示差熱質量分析と同じ深さで採取した。

(5) 圧縮強度の測定

試験体より直径 68mm のコアを採取し、コアの断面を切断した供試体を作製し、圧縮強度試験を実施した。試験は、JIS A 1107「コンクリートからのコアの採取方法及び圧縮強度試験方法」に準拠して行った。

試験は、2 種類の方法にて実施した。Case3 については、火害を受けた覆工コンクリートからコアを採取することを考慮して、加熱面から深さ方向にコアを採取し、加熱面からの深さごとに断面方向に切断した。Case4 については、供試体の側面から加熱面と平行な方向にコアを採取し、加熱履歴を受けた部分の断面を切断した。実際のトンネルで加熱面と平行な方向にコアを採取することは困難であるが、局所的に採取したコアと比較するために実施した。コアの採取方法を図-1 に示す。供試体の本数は、Case3 は 3 本ずつ、Case4 は 1 本ずつとした。

(6)反発硬度の測定

試験体より直径 100mm のコアを採取し、断面を半分 に切断し、切断面の反発硬度を小型の測定器を用いて測定した。測定状況を写真-1 に示す。加熱面から 200mm までは 10mm 間隔で、200mm 以深は 20mm 間隔で測定した。試験は、JSCE-G 504「硬化コンクリートのテストハンマー強度の試験方法」に準拠して実施した。打撃点数は 20 点とし、それぞれの偏差が平均値の±20%以上となる値があれば、その測定値を棄却し、これに代わる測定値を補った。

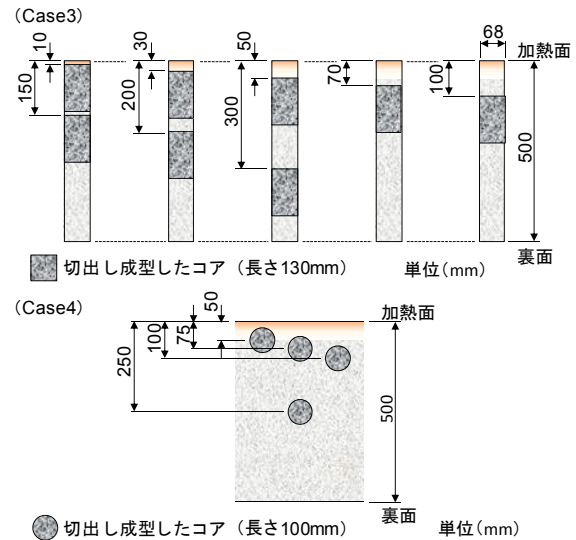


図-1 圧縮強度試験用のコアの採取方法

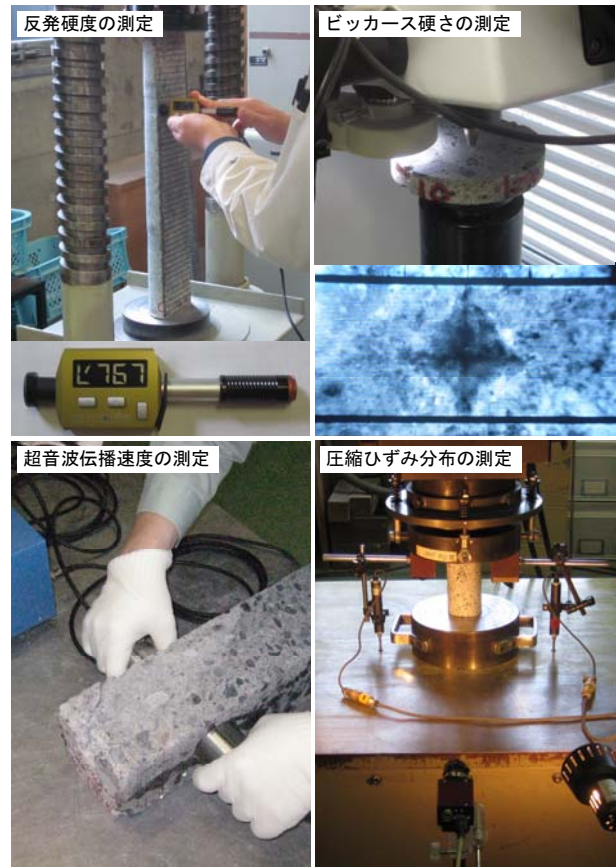


写真-1 各種方法における測定状況

### (7)ピッカース硬さの測定

試験体より採取した直径 100mm のコアを、断面に対して水平に切断し、試験片の表面を粒子径  $11.5 \times 10^{-6}m$  (#1000 番) の研磨材を用いて高精度に研磨して供試体を作製した。試験は、JIS R 1610「ファインセラミックスの硬さ試験方法」に準拠して、四角すいダイヤモンド圧子を試料表面に押しつけ、形成されたくぼみの対角線長さからピッカース硬さを計算した。測定状況を写真-1 に示す。試験片は厚さ約 20mm で切断し、加熱面から 10mm, 30mm, 50mm, 70mm, 100mm および 150mm の深さで測定を行った。

Case1 および Case2 については、JIS R 1610 に準拠して測点数を 5 点としたが、Case4 については、精度を高めるために、1 試験片における測点数を 20 点とし、(6)項と同様にそれぞれの偏差が平均値の  $\pm 20\%$  以上となる値があれば、その測定値を棄却し、これに代わる測定値を補った。

### (8)超音波伝播速度の測定

試験体より採取した直径 150mm のコアの側面部を切断し、1 辺 100mm の正方形断面に切り出した。成形した供試体の両側面にセンサ（発振子および受振子）を接触させ、両センサ間の距離と超音波の到達時間から、伝播速度を測定した。測定状況を写真-1 に示す。測定は、加熱面から 10mm 間隔で実施した。

### (9)画像解析による圧縮ひずみの測定

試験体より直径 68mm のコアを採取し、JIS A 1107「コンクリートからのコアの採取方法及び圧縮強度試験方法」に準拠して圧縮強度試験を実施した。その際に、小型の CCD カメラを用いて側面から撮影し、供試体の圧縮ひずみの分布を画像解析により求めた。採取したコアを断面方向に切断し、加熱面は石こうにてキャッピングを行い、試験を実施した。加熱履歴を受けていない健全なコアも採取し比較した。試験は、それぞれ 1 本ずつ実施した。測定状況を写真-1 に示す。

## 2.2 耐火試験結果

### (1) 試験概要

耐火試験には、厚さ 500mm の平板（以下、耐火試験体と呼称）を用いた。Case1 では、水平炉を使用し、耐火試験体の下方より加熱を行い、Case2~Case4 では、壁炉を使用し、水平方向から加熱を行った。耐火試験の概要を図-2 に示す。加熱履歴には、トンネル火災を想定した RABT 曲線を採用し、加熱開始後 5 分で  $1200^{\circ}C$  まで昇温し、60 分まで温度を保持した後に降温した。なお、いずれの耐火試験体も、PC 鋼棒を配置し、一方向に  $13N/mm^2 \sim 14N/mm^2$  の圧縮応力を導入した状態で加熱試験を実施した。また、耐火試験体には、加熱面から深さ

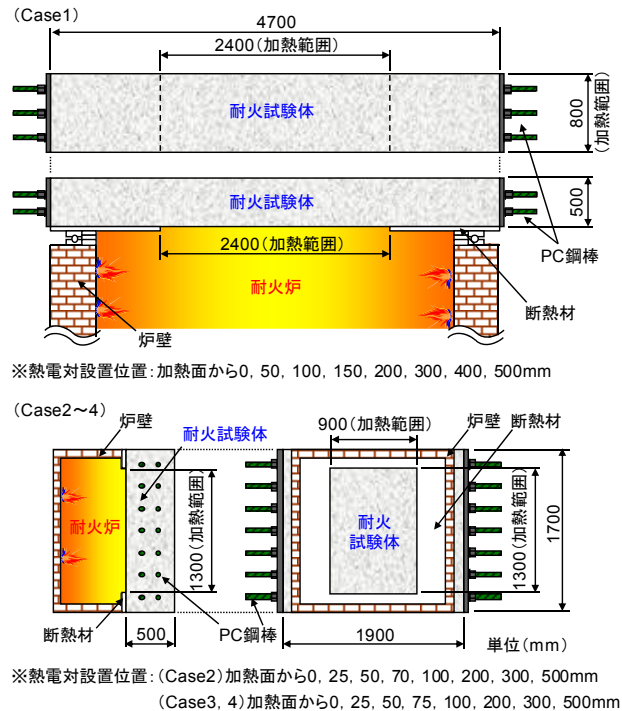


図-2 耐火試験の概要

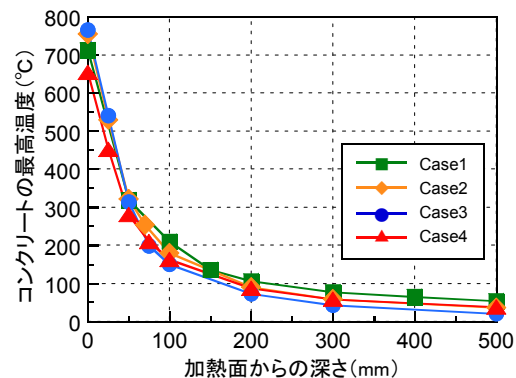


図-3 コンクリートの最高温度分布

方向ごとに熱電対を設置し、コンクリートの温度履歴を測定した。

### (2) 試験結果

耐火試験により得られた加熱面からの深さ方向におけるコンクリートの最高温度分布を図-3 に示す。RABT 曲線による加熱履歴を与えた試験体の深さ方向の最高温度分布は、配合や圧縮強度の水準が異なっても、概ね一致した。

セメントの水和物である水酸化カルシウム ( $Ca(OH)_2$ ) は、 $450^{\circ}C \sim 580^{\circ}C$  で脱水し生石灰 ( $CaO$ ) に変化し、炭酸カルシウム ( $CaCO_3$ ) は、 $750^{\circ}C \sim 900^{\circ}C$  で脱炭酸化し  $CaO$  に変化するとされている<sup>1)</sup>。耐火試験の結果から、コンクリートの最高温度は、加熱面では  $650^{\circ}C \sim 760^{\circ}C$  に達しており、9mm~35mm の範囲では  $450^{\circ}C \sim 580^{\circ}C$  であった。コンクリートの表層部では、 $Ca(OH)_2$  や  $CaCO_3$  が変質している可能性が高い。



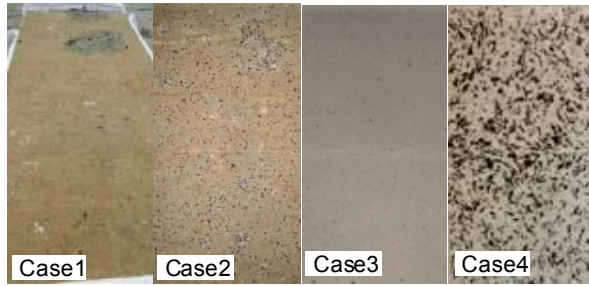


写真-2 加熱後の試験体の表面の状況（全景）



写真-3 採取したコアの側面の状況の例（Case3）

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 各測定方法の結果

##### (1) 目視観察結果

試験体の表面の状況を写真-2 に示す。試験体の表面は、黄褐色を呈しており、900℃～950℃以上の受熱を受けたものと推測される<sup>1), 2)</sup>。採取したコアの側面の状況の例（Case3）を写真-3 に示す。黄褐色を呈しているのは表面のみであり、表層部は灰褐色を呈していた。表層部は、600℃～950℃の受熱を受けたものと思われる<sup>1), 2)</sup>。図-3 の結果と一致した。表層部から深さ方向にひび割れが生じており、ひび割れ深さは60mm程度であった。

##### (2) 中性化深さの測定結果

中性化深さの測定結果の一例（Case3）を写真-4 に示す。中性化深さは、Case3で22mm、Case4で20mmであった。加熱されたコンクリートは、500℃程度でCa(OH)<sub>2</sub>が熱分解してCaOに変化し、pHが減少する。図-2 に示す最高温度分布によると、500℃近傍に達する深さは20mm～30mmであり、中性化深さと概ね一致した。

中性化深さの測定は、既往の知見<sup>1), 2)</sup>のとおり、500℃程度の加熱履歴を受け、強度が低下した範囲を簡易的に予測することが可能である。

##### (3) 示差熱質量分析の結果

示差熱質量分析の結果を表-3 に示す。表面部近傍にはCa(OH)<sub>2</sub>が認められず、Case4については、CaCO<sub>3</sub>も認められなかった。表層部のコンクリートは、450℃～900℃程度の受熱を受けたものと推定される。Case1がCaCO<sub>3</sub>の含有量が多いのは、石灰石微粉末の混入が原因であると思われる。耐火試験の結果から、表層部は600℃～800℃の範囲で推移しており、450℃～500℃に達する深さは20mm～30mmであった。温度のデータと分析の結果は概ね一致した。

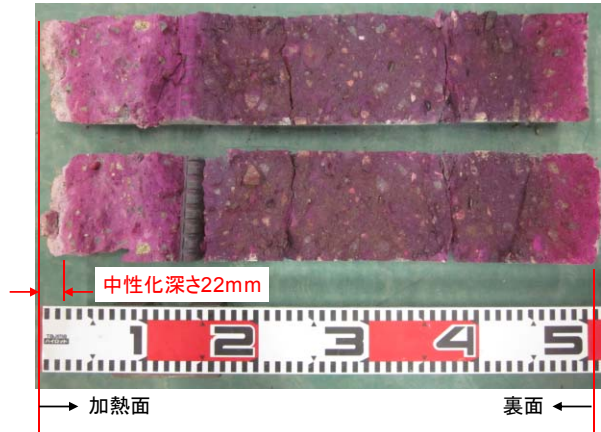


写真-4 中性化深さの測定結果（Case3）

表-3 示差熱質量分析結果

ケースNo.	加熱面からの深さ (mm)	重量減少率 (%)		含有率 (%)	
		460℃近傍	700℃近傍	Ca(OH) <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>
Case1	10	0.00	4.06	0.00	9.20
	50	0.46	5.86	1.89	13.30
	70	0.61	6.34	2.51	14.40
	100	0.57	6.28	2.34	14.30
	150	0.54	5.85	2.22	13.30
Case4	10	0.00	0.00	0.00	0.00
	30	0.00	0.44	0.00	1.00
	50	0.16	0.53	0.66	1.20
	70	0.15	0.28	0.62	0.64
	100	0.06	0.35	0.25	0.79
	150	0.22	0.44	0.90	1.00

##### (4) X線回折の結果

X線回折により化合物の種類を同定した結果、表層部には水酸化カルシウムの存在が認められず、示差熱質量分析の結果と同様な結果を示した。

中性化深さの測定や化学分析は、簡易な一次評価として、500℃程度の受熱を受けた範囲の推定には適しているが、中性化していない範囲でも強度が低下している可能性が高いため、深さ方向の劣化範囲の分布を推定するには、別の方法が必要である。

##### (5) 圧縮強度の測定結果

圧縮強度の分布を図-4 に示す。供試体の厚みがあるため、加熱面からの深さは、加熱面に最も近い位置で整理した。深さ方向からコアを採取したCase3は、加熱面に近づくほど、圧縮強度が低下した。加熱面と平行な方向からコアを採取したCase4についても、ばらつきが認められるものの、ほぼ同様な傾向を示した。

##### (6) 反発硬度の測定結果

反発硬度の測定結果を図-5 に示す。圧縮強度の分布と同様に、加熱面に近づくほど、反発硬度が低下する結果となった。特に、加熱面から60mm以下の範囲で急激に反発硬度が低下する結果となった。

##### (7) ビッカース硬さの測定結果

ビッカース硬さの分布を図-6 に示す。ビッカース硬

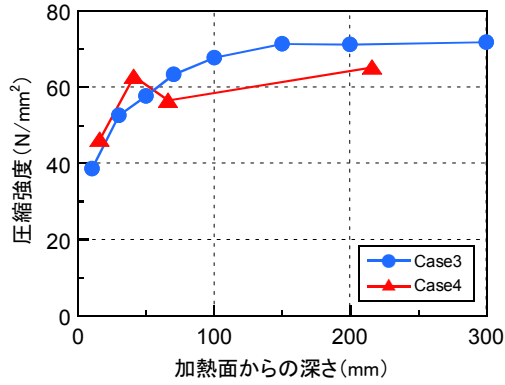


図-4 圧縮強度の分布

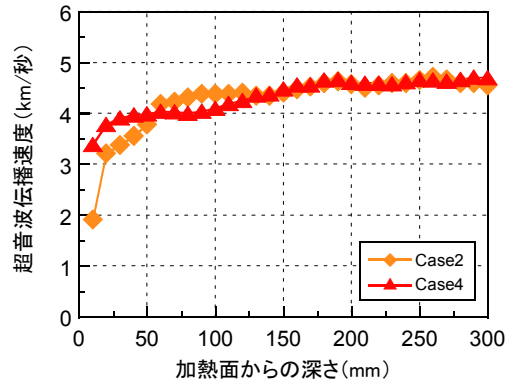


図-7 超音波伝播速度の分布

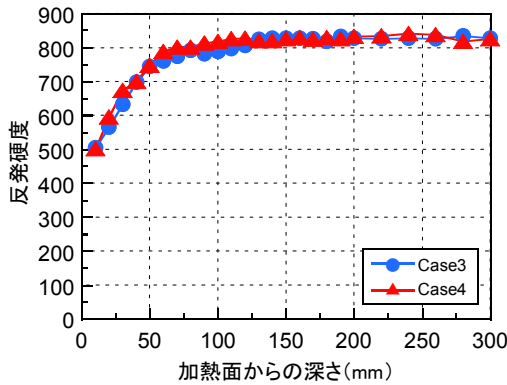


図-5 反発硬度の分布

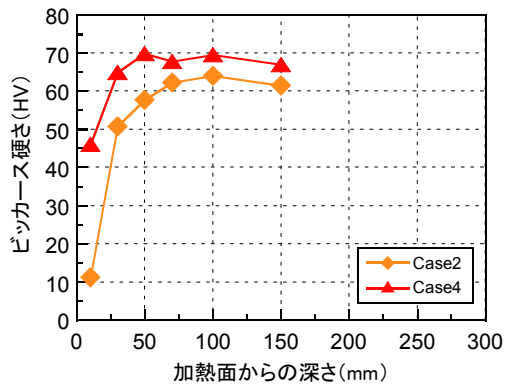


図-6 ビッカース硬さの分布

さについても、加熱面に近づくほどビッカース硬さが低下する結果となった。Case2 と Case4 で若干のばらつきが認められるが、深さ 50mm~70mm で傾きが変化しており、反発硬度の測定結果と同様な傾向を示した。加熱面に近づくほど、ばらつきが大きい結果であった。

(8)超音波伝播速度の測定結果

超音波伝播速度の分布を図-7 に示す。加熱面から150mm以下の範囲でCase2 と Case4 のばらつきが認められたが、他の測定方法と同様に加熱面に近づくほど、超音波伝播速度も小さい値を示した。

(9)画像解析による圧縮ひずみの測定結果

画像解析により測定した圧縮ひずみの分布を図-8 に示す。荷重を100kN(圧縮応力で28N/mm<sup>2</sup>作用時)作用

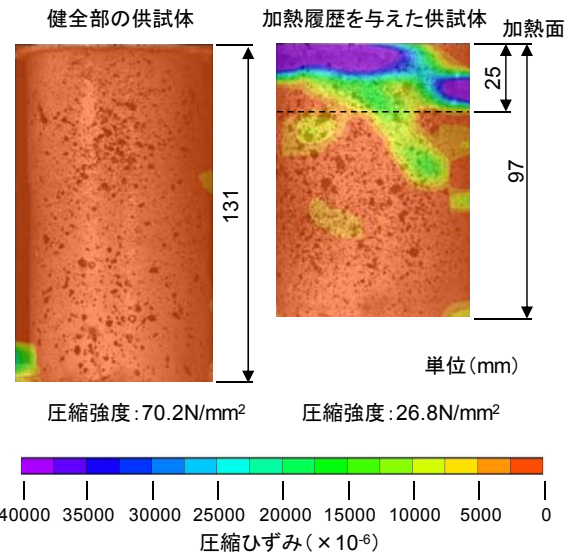


図-8 圧縮ひずみの分布の測定結果

させた時点で測定した。加熱履歴を与えた試験体は、加熱面から25mm程度の範囲のひずみが大きく、加熱面近傍が劣化していることが確認された。加熱履歴を与えた供試体の健全と考えられる部位や健全部の供試体については、圧縮ひずみが均一な分布を示した。

3.2 残存圧縮強度と劣化部の評価

加熱によるコンクリートの残存圧縮強度の分布を図-9 に示す<sup>4)</sup>。この分布と図-3 に示す耐火試験により得られた最高温度の分布から深さ方向の残存圧縮強度の分布を推定した(以下、推定値と呼称)。

また、圧縮強度、反発硬度、ビッカース硬さおよび超音波伝播速度について、それぞれの測定値を加熱による影響が小さい150mm以深の測定値の平均値で除して無次元化し、健全部に対する割合として評価した。ビッカース硬さについては、傾きの変化と、測定値のばらつきを考慮して、70mm以深の測定値を平均した。

健全部に対する割合と推定値を比較し、劣化範囲を推定した。Case2~Case4における各種計測値と推定値との比較を図-10~図-12 に示す。Case3は、圧縮強度と反

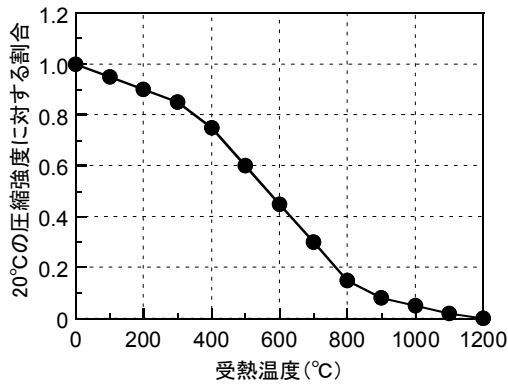


図-9 コンクリートの残存圧縮強度分布<sup>4)</sup>

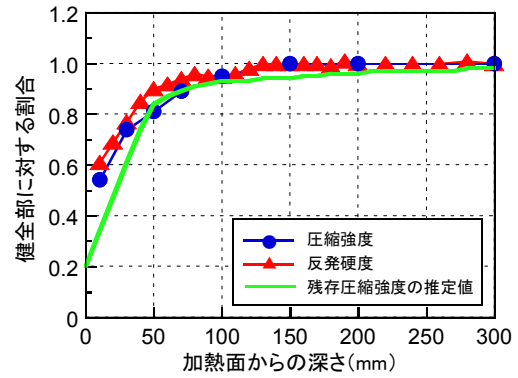


図-11 各測定方法による推定値の比較 (Case3)<sup>3)</sup>

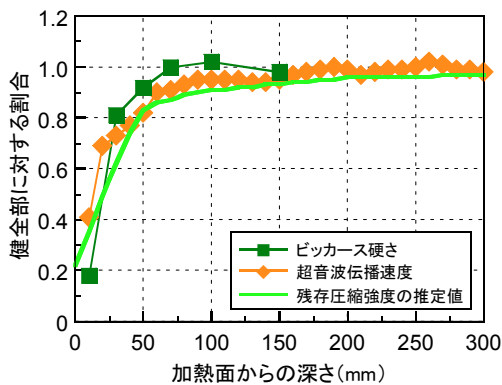


図-10 各測定方法による推定値の比較 (Case2)

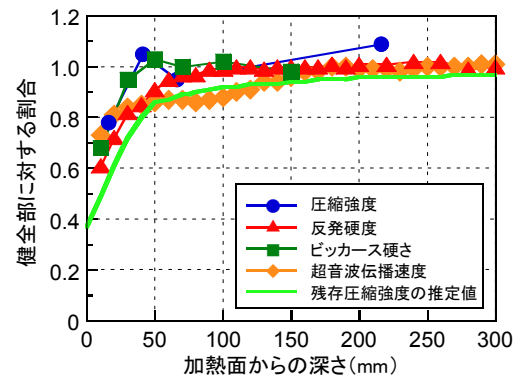


図-12 各測定方法による推定値の比較 (Case4)

発硬度の相関が高い結果であった。また、Case3 および Case4 は、加熱面より 50mm 以下の範囲において、測定値が推定値よりも大きい値を示した。また、ビッカース硬さについては、Case2, Case4 ともに推定値より測定値が大きい値を示す傾向が認められた。

コンクリートの物性に与える影響が比較的小さい範囲を推定するための受熱温度の目安は 350°C とされている<sup>4)</sup>。図-9 から受熱温度が 350°C を超えると急激に圧縮強度が低下しており、受熱温度が 350°C のとき残存圧縮強度は 80% 程度である<sup>4)</sup>。図-3 に示す耐火試験より得られた温度データから最高温度が 350°C に達する深さは 50mm 程度であった。今回の測定値からいずれのケースも健全部に対する割合の傾きが大きく変化している範囲は加熱面から 50mm~70mm であり、ほぼ一致する結果であった。このことから、加熱により強度低下した範囲の推定が可能であると思われる。

#### 4. まとめ

トンネル火災を想定した RABT 曲線による加熱履歴を与えた試験体からコアを採取し、各種測定方法により劣化した範囲を推定した結果、以下の知見が得られた。

(1) 中性化深さの測定、示差熱質量分析および X 線回折により、水酸化カルシウムが変質した範囲を特定することで、受熱温度とその深さを推定できる。

- (2) 圧縮強度、反発硬度、ビッカース硬さおよび超音波伝播速度を測定することで、加熱履歴を受けたコンクリートの劣化深さの範囲を推定できる。
- (3) 圧縮ひずみを画像分析により測定することにより、劣化深さの範囲を特定できるとともに、圧縮ひずみの分布図の作成が可能である。
- (4) 劣化範囲を簡易に推定できる方法として、小型の測定器を用いた反発硬度の測定方法や画像解析による圧縮ひずみ分布の測定方法の実用性を確認した。

#### 参考文献

- 1) 公益社団法人日本コンクリート工学会：コンクリートの高温特性とコンクリート構造物の耐火性能に関する研究委員会報告書，2012.5
- 2) 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
- 3) 永井 政伸，高浜 達矢，久末 賢一，川西 貴士：火災を受けたコンクリートの劣化範囲の推定に関する一考察，土木学会第 67 回年次学術講演会講演概要集，V-181，pp.361-362，2012.8
- 4) 首都高速道路株式会社：トンネル構造物設計要領（シールド工法編），第 3 編 耐火設計，pp.1-27，2008.7