

# 論文 トンネル内車両火災によるコンクリートの火害と劣化診断

清宮 理\*1・安本 辰也\*2・本田 陵二\*3・篠田 佳男\*4

**要旨:** 火害を受けた鉄筋コンクリート部材の現場での健全度の迅速な判断のための診断手法の整備と基礎情報の収集を目的として耐火試験を行い、反発度、中性化深さ、弾性波速度、細孔径分布および貫入抵抗値を調査した。その結果、強度低下と中性化深さは加熱温度に大きな影響され、中性化は1年を経過するとほぼ回復することがわかった。また、大規模火災を想定した加熱温度を受けると、ポリプロピレン繊維(PP 繊維)を混入するとコンクリートに爆裂を生じなかったが、かぶり部分の弾性波速度は小さくなった。孔内載荷試験は、火害の深さ方向の劣化に対して迅速で簡便な診断方法として概ね評価できた。

**キーワード:** 耐火試験, ポリプロピレン繊維, RABT 加熱曲線, 中性化深さ, 弾性波速度, 孔内載荷試験

## 1. はじめに

供用されているシールドトンネルや沈埋トンネルにおいて、車両火災が発生すると、人命損失や道路交通網の切断など、社会へ与える影響が極めて大きい。また、鉄筋コンクリートの性能低下が生じ、トンネルの供用再開には、安全確認が重要となる。

著者らは、トンネルの耐火設計を行う場合に広く採用されている RABT 曲線に基づいて、3 種類の車両火災を想定した耐火試験を行った。コンクリート板が受ける損傷程度や、高強度コンクリートの爆裂抑制に使用されているポリプロピレン繊維(以下、PP 繊維)<sup>1)</sup>および耐火被覆板の有効性について検討を行った<sup>2)</sup>。

トンネル火災後の復旧を想定すると、現地の状況に適した迅速で適切な診断手法の整備が肝要となる。本研究では、耐火試験を実施した試験体を対象に、加熱直後と13ヶ月経過時の強度や劣化程度に関する各種実験を実施し、これらの結果および診断方法の検討を行った。

強度コンクリートの2水準と、PP 繊維の混入の有無の2水準、RABT 曲線3水準である。コンクリートは、表-1に示す配合のもので、設計基準強度(材齢4週、蒸気養生)が、高強度コンクリートで48N/mm<sup>2</sup>、普通コンクリートで20N/mm<sup>2</sup>とした。セメントは普通ポルトランドセメント、細骨材および粗骨材は硬質砂岩の砕砂および砕石を、また PP 繊維は織度 17dtex、長さ 20mm のものを用いた。

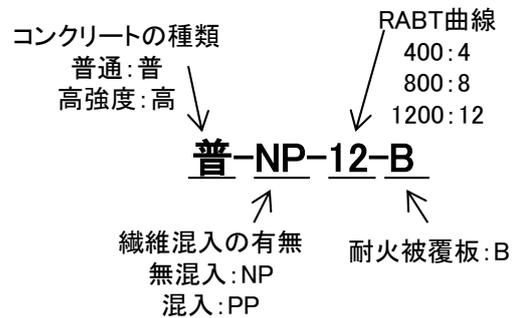


図-1 試験体の名称

## 2. 試験方法

### 2.1 試験体

試験体の名称を図-1 に示す。普通コンクリートと高

表-1 コンクリートの配合

種類	粗骨材 最大寸法 (mm)	スラン プ (cm)	空気 量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					
						水	セメ ント	細骨材	粗骨 材	混和 剤	PP 繊維
高強度コン クリート	20	8.0 ±2.5	2.0 ±1.0	35.5	43.0	150	423	789	1052	4.23	0.0
普通コン クリート			4.0 ±1.0	49.4		153	310	805	1071	1.55	0.0
											2.0

\*1 早稲田大学 創造理工学部 社会環境工学科教授 工博 (正会員)

\*2 (株) エーアンドエーマテリアル 技術開発研究所

\*3 日本コンクリート技術 (株) 技術部 博 (工) (正会員)

\*4 日本コンクリート技術 (株) 代表取締役 博 (工) (正会員)

加熱後の試験体状況を、写真-1 に示す。600×130×200mm の形状寸法の試験体を使用した。試験体の加熱は、荷重を載荷しない状態で片面からとし、被覆材を挟んで試験体 2 体を炉の上に載せ、側面から加熱されないように被覆材を用い熱が伝わらない様にした。加熱曲線は、普通自動車などによる小規模火災、バスなどによる中規模火災、タンクローリー車など危険物積載車両による大規模火災の 3 つの状況を想定し、ドイツの基準である RABT 曲線を 400℃、800℃および 1200℃とした。この 1200℃については厚さ 28mm のけい酸カルシウム系の耐火被覆板を取り付けた試験体を製作してこの効果も合わせて検討を行った。加熱終了後は、試験体を室内で保管した。



写真-1 試験体状況の一例 (高-NP-12)

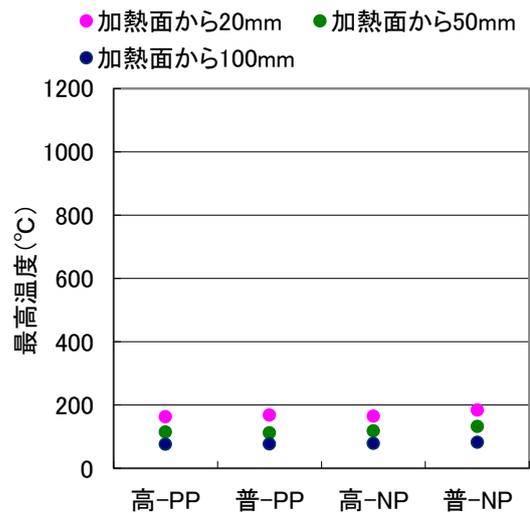
## 2.2 試験体の火害状況<sup>2)</sup>

加熱試験時におけるコンクリート内部の最高温度測定結果を図-2 に示す。温度計測は、試験体の中央部の加熱面から深さ 20mm、50mm、100mm の位置で熱電対により行った。

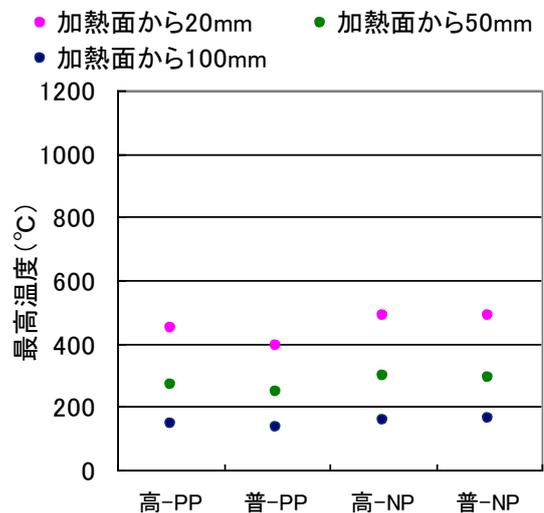
(a) の RABT400 においては、PP 繊維混入の有無、コンクリート板の種類に関わらず、いずれもコンクリート内部の最高温度は加熱表面から 20mm の位置で約 180℃、50mm の位置で約 130℃であった。

(b) の RABT800 において、PP 繊維混入した試験体の場合、コンクリート内部の最高温度は加熱表面から 20mm の位置で約 450℃、50mm の位置で約 270℃であったが、いずれの試験体においても爆裂は生じなかった。

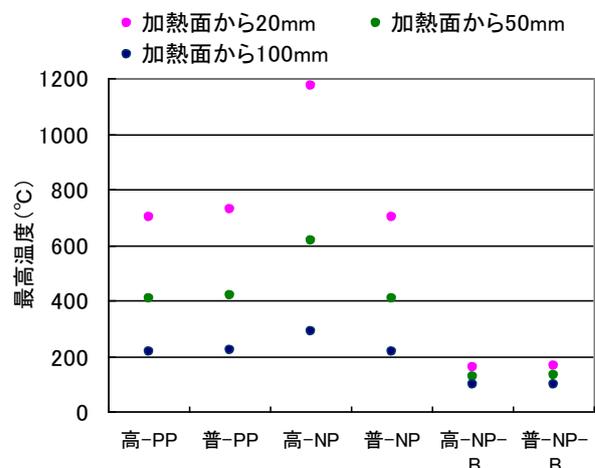
(c) の RABT1200 において、高-NP は加熱面で最大深さで 30mm まで爆裂が生じており、他の試験体と比較して内部温度が高くなった。普-NP も深さ 4mm 程度の小範囲で爆裂がみられた。PP 繊維を混入した高-PP、普-PP では、加熱後の表面に爆裂は生じていない。なお、耐火被覆板を使用したものは、深さ 20mm でも最高温度が 200℃以下と、コンクリート板で火害はほとんど認められなかった。



(a) RABT400



(b) RABT800



(c) RABT1200

図-2 コンクリート内部における最高温度計測結果

## 2.3 試験内容

試験は、反発度、中性化深さ、弾性波速度、細孔径分布および孔内載荷試験に関して行った。

### (1) 反発度

コンクリートの強度は、JIS A 1155「コンクリート反発度の測定方法」に準拠してリバウンドハンマーを用いて測定を行った。測定箇所は加熱時に炉の中央部となった試験体側面部とした。リバウンドハンマーの打撃位置の一例を写真-2 に示す。写真中の線の交点が打撃位置となっている。反発硬度の測定は試験体に対して、垂直に行い、高さ方向に加熱面から 25mm 間隔で 7 箇所、水平方向にセンター振り分けで 50mm 間隔の 7 箇所ずつそれぞれ 49 点打撃した。



写真-2 テストハンマー打撃位置の一例(普-NP-12)

### (2) 中性化深さ

中性化深さの測定は、JIS A 1152「コンクリートの中性化深さの測定方法」に準拠し、フェノールフタレイン法により実施した。加熱 1 ヶ月後の試験はコアを採取し測定を行い、13 ヶ月後の試験も新たにコアを採取し測定した。

### (3) 弾性波速度

弾性波速度は試験体からコアを取り出し、コア供試体に超音波法 (ASTM C 597) を適用して測定した。円柱供試体に対して互いに直行する 2 方向について行い、その平均値をその位置における弾性波速度とした。また、深さ方向の測定は加熱面から 100mm までの間を 5mm 間隔、100mm から 190mm までを 10mm 間隔で行った。

### (4) 細孔径分布

細孔径分布試験は水銀圧入式ポロシメーターを用いて行った。試験箇所は、温度によるセメント硬化体の変質および超音波法による測定位置を含めて決定した。セメント水和組織は遊離水や結晶水が 100℃以上で分離・消失し約 700℃で完全に脱水して不可逆変化となる。そして、500~580℃で水酸化カルシウムが熱分解し、内部組織がポーラスな状態となる<sup>3)</sup>。また、PP 繊維は 160~

170℃で溶融する。これらのことをふまえて図-3の加熱時における温度履歴に着目すると、表面から 20mm 以内で完全脱水、20~50mm で水酸化カルシウム熱分解、100mm 付近で PP 繊維溶融となる。測定は耐火被覆板を使用しない RABT1200 の 4 試験体に対して、水酸化カルシウムが熱分解すると考えられる 25mm 位置で試料を採取して行った。この位置は、鉄筋のかぶり厚さ中央でかぶりコンクリートの品質を代表できる。

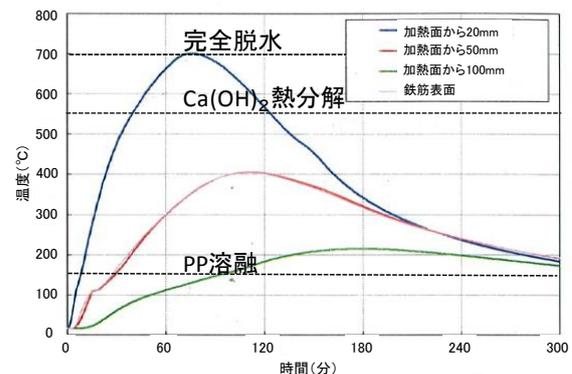


図-3 コンクリート内部の温度履歴 (高-PP-12)

### (5) 孔内載荷試験

孔内載荷試験は、コンクリート表面からの劣化深さ診断するため試験方法である。火害調査の適用についても検討され始めている<sup>4), 5)</sup>。孔内載荷試験は、中性化深さ試験で使用したφ100mmのコア孔に写真-3に示す試験装置を入れ、加圧して荷重先端を貫入した。測定は、図-4に示すようにコア孔の同一深度において方位を変え、1深度当たり4点以上行った。貫入抵抗値は、図-5に示す貫入量と荷重の曲線の傾きとした。



写真-3 孔内載荷試験装置

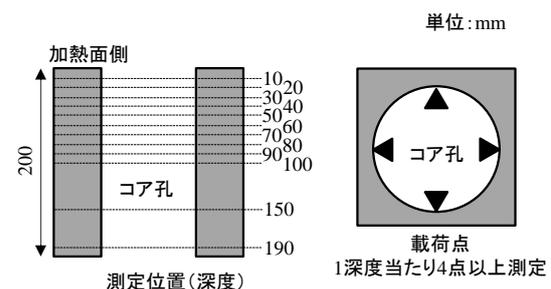


図-4 孔内載荷試験の測定位置

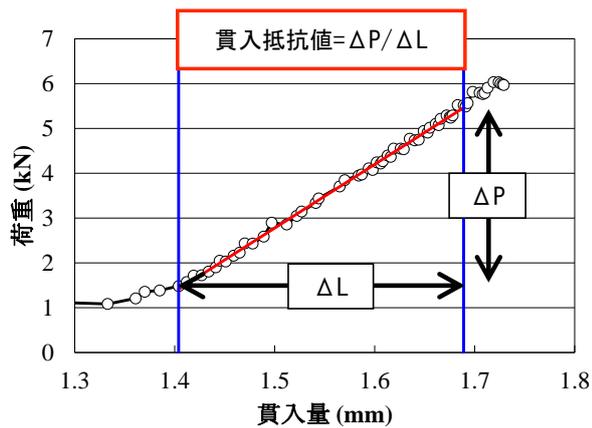


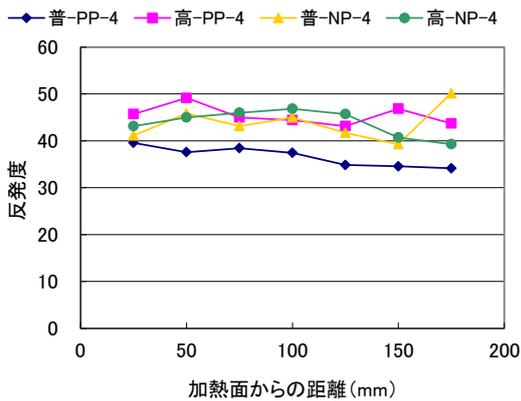
図-5 貫入抵抗値の求め方

### 3. 試験結果および考察

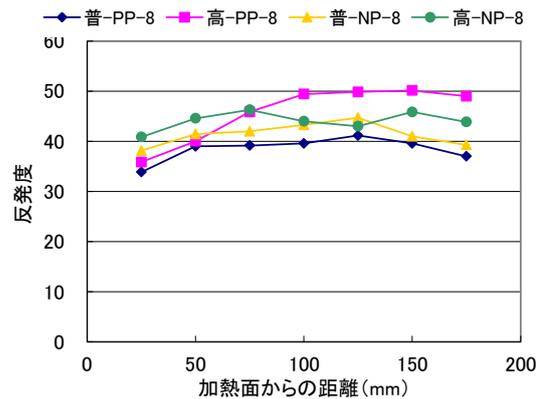
#### 3.1 反発度

加熱面からの距離と反発度の関係を図-6 に示す。ここで、反発度は加熱面からの距離別に水平方向の7点の

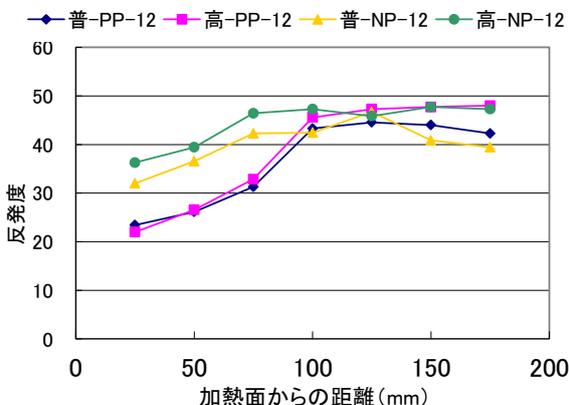
平均値を示している。RABT400において、受熱温度は加熱面からの距離 20mm の位置でも 200℃以下であった。この温度環境下ではコンクリート表面の自由水の蒸発や化学結合水の逸失が始まっている<sup>3)</sup>が、反発度には変化は見られない。RABT800において、加熱面からの距離 20mm で 500℃程度となり水酸化カルシウムの分解<sup>3)</sup>によって、20mm の位置で反発度 35 程度と低下が見られた。RABT1200 の反発度においては、加熱面から 25mm の位置で PP 繊維無混入の普-NP-12 が 32、高-NP-12 が 36 と 100mm の位置に比べて 20%程度と低下率が小さい。これに対して、PP 繊維混入の普-PP-12 が 23、高-PP-12 が 22 であった。PP 繊維混入の試験体において反発度の低下が大きくなる傾向がみられた。これは、PP 繊維は 160～170℃で融解し空隙が出来るためと考えられる。耐火被覆板を使用した試験体については、RABT400 のものと同様に加熱面での反発度の低下が見られなかった。



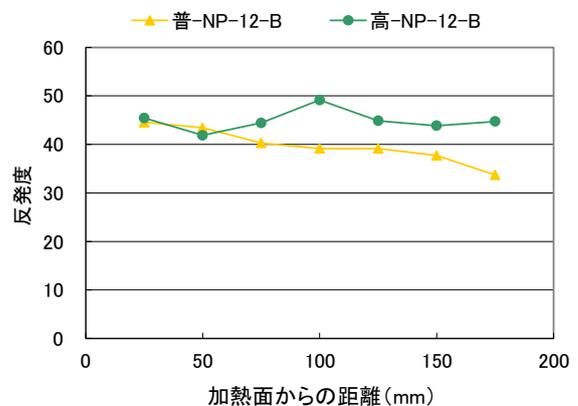
(a) RABT400



(b) RABT800



(c) RABT1200



(d) RABT1200-B

図-6 加熱面からの距離と反発度の関係

### 3.2 中性化深さ

中性化試験結果を図-7に示す。測定は、耐火試験の1ヵ月後と13ヵ月後に行った。加熱面に爆裂による欠損があったものについては、欠損部分も中性化深さに含まれるものとして測定している。1ヵ月後の中性化深さは、RABT400で0mm、RABT800で30mm程度、RABT1200で60mm程度となった。加熱温度が大きくなるほど、普通・高強度コンクリートともに中性化深さが大きくなり、加熱温度に大きな影響を受けていることが分かる。中性化深さは、PP繊維混入の有無、普通・高強度コンクリートの違いによる影響は見られなかった。

次に、13ヵ月後の中性化深さをみると、RABT800は数mmになり、またRABT1200で約10mmと小さくなっている。このように、中性化深さは、再水和などにより時間の経過とともに大幅に回復することが確認された。

### 3.3 弾性波速度

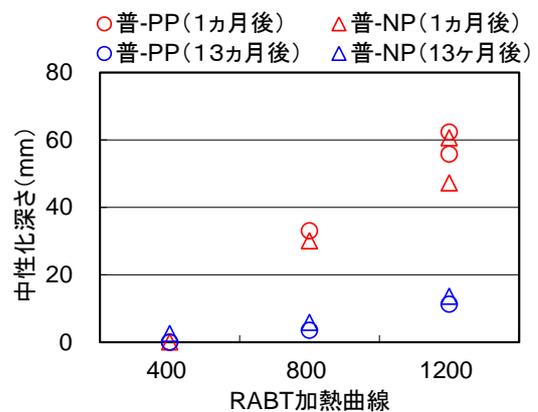
RABT1200の弾性波速度結果を図-8に示す。弾性波速度を500m/sごとに色分けした。加熱面から離れるにつれて弾性波速度は増加する傾向にある。1ヵ月後の弾性波速度について、加熱面からの距離100mmでは、爆裂した高-NPを除き、200℃以上である。同じ受熱温度ではあるが、普-NPはピンク色であった。繊維無混入のものについてコンクリートの内部まで弾性波速度が低下している傾向が見られた。また、耐火被覆板の有無による影響について、加熱面からの距離が普-NP-12-Bでは30mm以上、高-NP-12-Bでは20mm以上で青色と火害の影響は少なかった。RABT1200に対して、耐火被覆板によって受熱温度を加熱面からの距離20mmで200℃以下に抑えることができ、コンクリート中の水酸化カルシウムの分解を防止することができた。今回実施した試験体の中で加熱によるコンクリートの劣化を最小限に抑えることができた。そのため、健全時の弾性波速度は、耐火被覆板の試験体の加熱面が100mm以上の計測値から、高強度コンクリート4200~4500m/s、普通コンクリート4100~4300m/sと判断できる。

13ヵ月後の弾性波速度は、赤色の領域がなく、またピンク色の領域も大幅に少なくなっている。高-PPは加熱

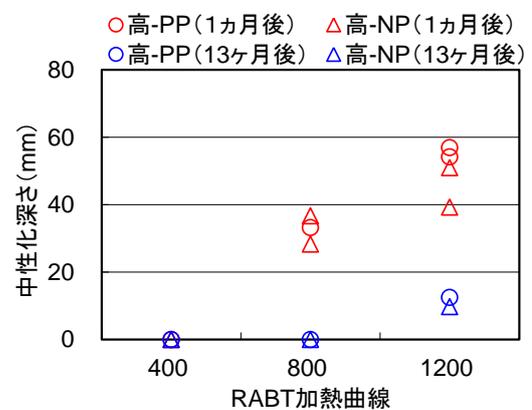
面からの距離70mm以上で緑色、高-NPは160mm以上で緑色となっており、高-NPは爆裂によって内部まで弾性波速度が小さい。

13ヵ月後の弾性波速度は、1ヵ月後と比較して全体的に中性化深さと同様に回復傾向を示し、ピンク色がほぼなくなっている。ただし、加熱面から離れた位置でも青色までは回復しない。なお、PP繊維混入の有無、普通・高強度コンクリートに回復傾向の違いは見られなかった。

このように、大規模火災を想定した加熱温度を受けると、PP繊維を混入しても弾性波速度は小さくなった。これは反発度で確認されたように、PP繊維の溶解による影響が考えられる。



(a) 普通コンクリート



(b) 高強度コンクリート

図-7 中性化試験結果

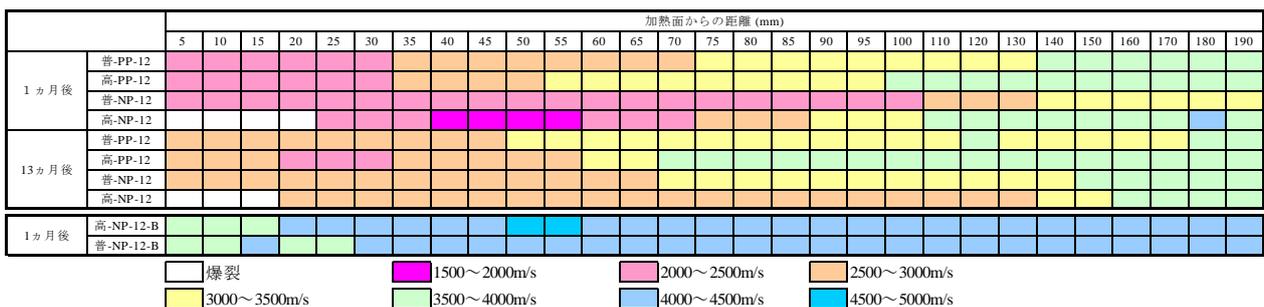


図-8 耐火試験1ヵ月後および耐火試験13ヵ月後の弾性波速度 (RABT1200)

### 3.4 細孔径分布

図-9 に細孔径分布の加熱面からの距離 25mm の測定結果を示す。普通コンクリートで累積細孔容積量が若干大きくなっているが、全体的に差が認められない。加熱面から 25mm は水酸化カルシウム熱分解の受熱温度を超えているが、セメントの水和組織に問題が生じるまで至らない。反発度で示したように、同一の 25mm 位置で反発度は低下するが、PP 繊維無混入のもので 20%程度と小さいことも同様な結果を示唆している。ただし、弾性波速度が低減していることから、内部に空隙や微細なひび割れの発生が推定される。

### 3.5 孔内載荷試験

RABT1200 の孔内載荷試験結果を図-10 に示す。本試験は加熱試験終了後 13 ヶ月目に行った。貫入抵抗値は、加熱面からの距離が離れると値が変動しながら 70~80mm 程度まで増大し、それを過ぎると若干小さくなる箇所があるがほぼ一定となった。繊維混入の有無を比較すると、貫入抵抗値は、加熱面からの距離 70mm まで高-PP-12 が小さな値となった。普-PP-12 は繊維無とほぼ同じ値となった。全体的に見ると普通コンクリートと高強度コンクリートの違いによる大きな差は見られなかった。

孔内載荷試験の計測値のバラつきが大きいいため値が変動しており、火害の深さ方向に対して弾性波速度試験の方が詳細に診断できた。しかしコンクリートの高強度、部材厚の低減化が行われているシールドトンネルのセグメントでは、φ100mm のコアを採取する必要がある弾性波速度に比べて、φ42mm の小径で実施できる孔内載荷試験の方が、安全に現場で迅速にかつ簡便に診断できると考える。本試験の結果から火害の深さ方向の劣化に対して弾性波速度や反発度と傾向はほぼ同じであり、診断方法として概ね評価できることがわかった。

## 4. まとめ

本実験で得られた結果を以下に示す。

- (1) 反発度は加熱温度の影響を受け、コンクリート表面から 100mm 以内で小さくなった。25mm 位置でみると RABT1200 で PP 繊維混入の方が、混入無しより 30%程度反発度の値が小さくなった。
- (2) 中性化深さは加熱温度の影響が大きく RABT1200 でコンクリート表面から 60mm 程度となった。ただし、中性化深さは 13 ヶ月後に 10mm 程度と、大幅な回復が確認された。
- (3) RABT1200 に対して PP 繊維を混入することで、高強度コンクリートの爆裂は防止できた。ただし、弾性波速度は混入しない時より低減した。弾性波速度も 13 ヶ月後で値が回復したがこの程度は若干であった。
- (4) 細孔径分布は水酸化カルシウムが熱分解する温度以

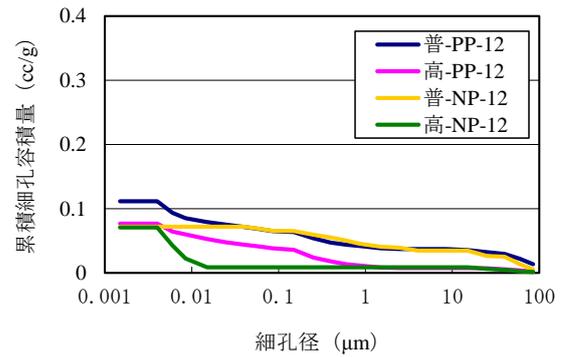


図-9 表面からの距離 25mm における細孔径分布

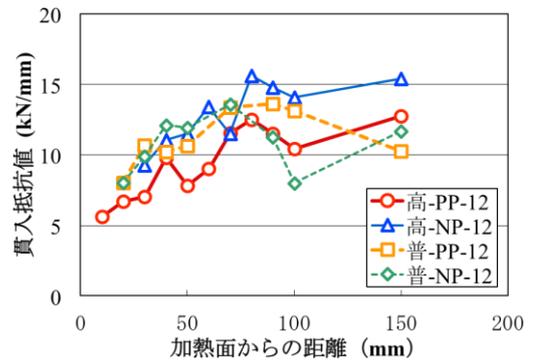


図-10 孔内載荷試験結果 (RABT1200)

上でも、セメントの水和組織が粗になるような結果は認められなかった。

(5) 孔内載荷試験による貫入抵抗値は火害の深さ方向の劣化に対して弾性波速度や反発度と傾向はほぼ同じであり、迅速で簡便な診断方法として概ね評価できることがわかった。

### 参考文献

- 1) 石黒義晃, 鈴木義信: 中央環状品川線耐火機能一体型 RC セグメントの適用, コンクリート工学, vol.49, No.1, pp.85-88, 2011.1
- 2) 清宮理, 安本辰也: 車両火災によるコンクリート板の損傷に関する耐火試験, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.1150-1155, 2012.7
- 3) 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, 2012.5
- 4) 皿井剛典, 田中徹, 澤口啓希: 孔内局所載荷試験による構造物の深さ方向のコンクリート物性評価に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.1828-1833, 2012.7
- 5) 阪口明弘, 春畑一, 皿井剛典: 火害を受けたコンクリート構造物の劣化診断手法の検討(その1~3), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.233-238, 2012.9