

# 報告 RCセグメントの高温時の特性

堀 誠行\*1・大関 宗孝\*1・大塚 孝義\*2・神田 亨\*2

**要旨：**二次覆工を省略したシールドトンネルでは、火災時はセグメントが直接高温にさらされることが想定される。RCセグメントのような高強度コンクリートは通常のコンクリートに比べ爆裂現象を生じやすいとされているが国内における検討事例は非常に少ない。ここでは実セグメントに部材厚や養生条件を合わせた試験体を用い、RABT曲線による時間温度曲線の下で耐火実験を行い、セグメントの高温時の性状を検討した。応力レベル、含水率、耐火材の厚さ等をパラメータに温度履歴や爆裂挙動を中心に検討を行った。

**キーワード：**シールドトンネル, RCセグメント, 耐火, RABT 曲線, 爆裂

## 1. はじめに

二次覆工を省略したシールドトンネルでは、火災時にセグメントが直接高温にさらされることになる。ヨーロッパでは大きなトンネル火災が頻発していることもあり、耐火工の施されたトンネルも多く、セグメントの耐火実験も数多く行われている<sup>1)</sup>。一般にRCセグメントのような高強度コンクリートは爆裂を生じやすいとされているが、我国では高温時のRCセグメントの特性を検討した事例は極めて少ない。ここでは、火災時のRCセグメントの挙動を把握する目的で行った耐火実験の結果について報告する。

## 2. 実験方法

### 2.1 試験体

試験体は、対象とするトンネルの実セグメントに部材厚と養生条件を合わせている。図-1に示すように幅600×長さ900×厚さ550mmの直方体であり、一部の試験体には長手方向に4本のPC鋼棒で13N/mm<sup>2</sup>相当の圧縮応力を導入している。加熱面は底面になる。

### 2.2 コンクリートの配合

示方配合を表-1に示す。設計基準強度 48N/mm<sup>2</sup>

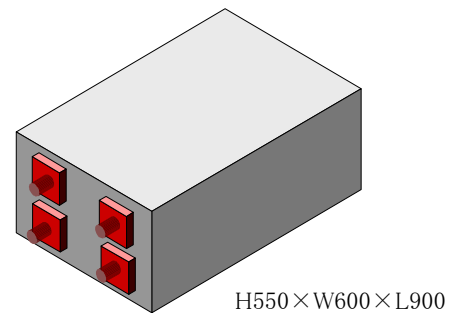


図-1 試験体

の高強度コンクリートであり、セメント量の50%を高炉スラグで置換している。骨材には硬質砂岩を使用している。養生条件は実セグメントに合わせ、30℃、3時間の蒸気養生後、4週間水中養生を行った。乾燥状態を想定した試験体については1週間で水から出し、その後気乾養生を行った。

表-1 コンクリートの配合

Gmax (mm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	設計基準強度 (N/mm <sup>2</sup> )	
20	1.8	31.9	40.0	48	
単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					
W	C	S	G	高炉スラグ	高性能減水剤
134	210	744	1149	210	4.2

\*1 日本RCセグメント工業会 (正会員)

\*2 日本シビックコンサルタント 技術本部 (正会員)

### 2.3 耐火炉

独立行政法人建築研究所の大型水平炉を使用した。写真-1に試験状況を示す。

### 2.4 温度測定

図-2に示すようにK型熱電対を配置した。試験体中心部の2断面に、各々7点ずつ配してある。No. 3は主筋温度を測るためのものである。



写真-1 試験状況

### 3. 爆裂実験

まずRCセグメント単体の高温時の挙動を確認する目的で、耐火被覆のない試験体を直接加熱する実験を行った。

#### 3.1 時間温度曲線

欧米ではトンネル火災を想定した耐火実験<sup>1),2)</sup>が多数行われており、各種の時間温度曲線が提案されている。しかしながら我国にはこの種の時間温度曲線が存在しないため、ドイツの基準であるRABT曲線を採用するものとした。図-3に示すように加熱開始後5分で一気に1200℃に達し、60分まで継続するものである。

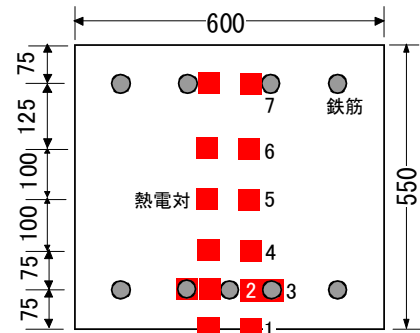


図-2 熱電対設置位置

図-4に炉内温度の実測例を示す。炉内に設置した10点の熱電対の温度履歴をプロットしたものであるが、ばらつきが極めて少なく、RABT曲線を忠実に再現している事がわかる。

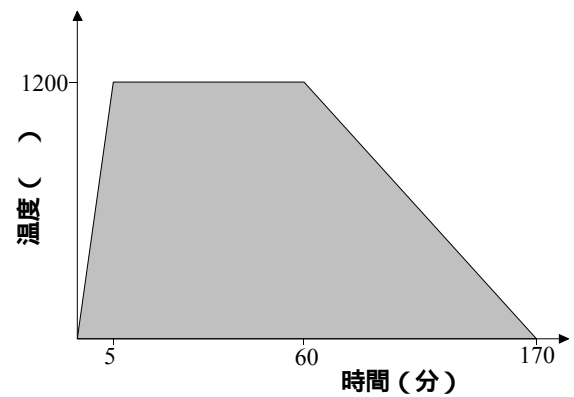


図-3 RABT曲線

#### 3.2 実験パラメータ

圧縮応力の有無と含水率をパラメータとし表-2に示す3体の試験体を用いて実験を行った。

炉内の状況をビデオ撮影により観察するとともに、試験体に取り付けたAEセンサーにより爆裂の頻度を音響的に測定した。

#### 3.3 温度履歴と爆裂状況

図-5~7に各試験体の温度履歴を示す。いずれの試験体も、加熱開始4分前後から爆裂を始めた。かぶり部分のコンクリートが徐々に吹き

表-2 試験体一覧

試験体	圧縮応力 (N/mm <sup>2</sup> )	含水率 (%)	略号
応力あり-湿潤	13	4	SM
応力なし-湿潤	0	4	NM
応力あり-気乾	13	3	SD

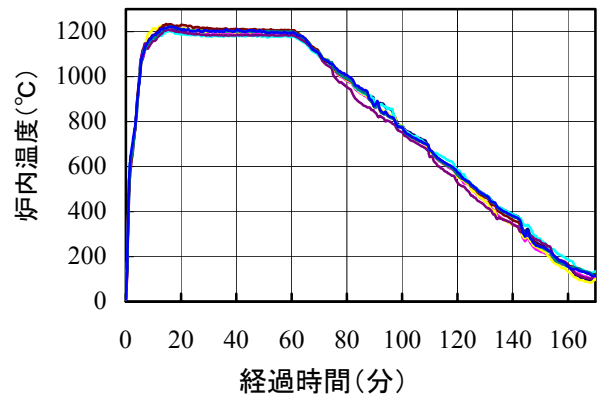


図-4 炉内温度

飛んでいくにつれ、10分後からは鉄筋の温度が急激に上昇を始めた。しかしながら大きな爆裂は比較的早い段階で配力筋の深さで止まった。コンクリート表面温度は炉内温度よりやや遅れて1200℃付近まで達した。鉄筋温度は70分で最高値に達した。

最も温度が上昇したのは、図-5のSM（応力あり-湿潤）の試験体であり、800℃に達している。これは後述のように爆裂深さが最も大きくなったためと考えられる。図中に記載された、表面は図-2の1番、鉄筋は3番、150mmは4番、350mmは6番の熱電対に相当する。鉄筋は300℃を超えると強度低下が著しくなる<sup>3)</sup>とされており、鉄筋温度が800℃にも上昇した状態ではRCセグメントの耐力低下が懸念される。

図-5～7には加熱面から150mm、350mmの点における温度履歴もプロットしてある。これを見ると、表面が1200℃に達し、かぶりコンクリートが吹き飛んだ状況においても、150mmの位置では200℃以下に保たれており、350mmの位置にはほとんど熱が伝わっていないことが分かる。

写真-2に試験後の加熱面の状況を示す。試験体ごとに爆裂深さには差が見られるが、損傷の状況はよく似ている。応力をかけた試験体では配力筋が見える深さまで爆裂が生じている。表面を観察すると粗骨材が溶けて飴状になっていた。

### 3.4 爆裂深さに関する考察

爆裂の程度を把握するために、加熱面をメッシュ状に測定し、爆裂深さのコンターを作

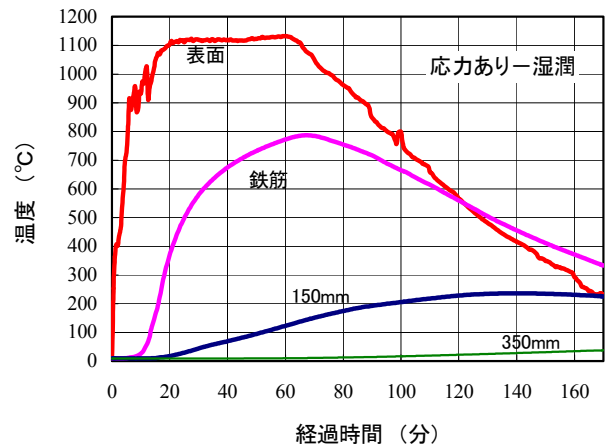


図-5 温度履歴（応力あり-湿潤）

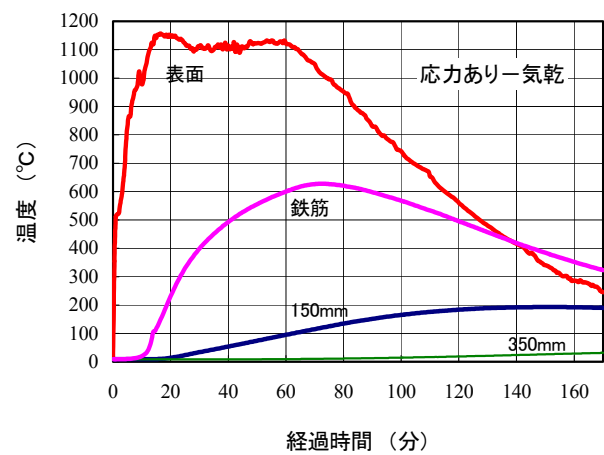


図-6 温度履歴（応力あり-気乾）

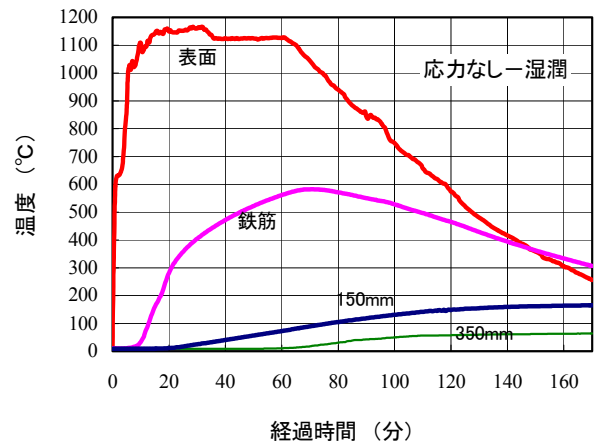


図-7 温度履歴（応力なし-湿潤）

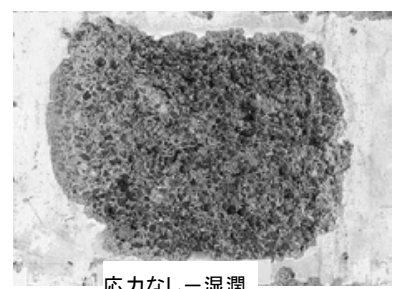
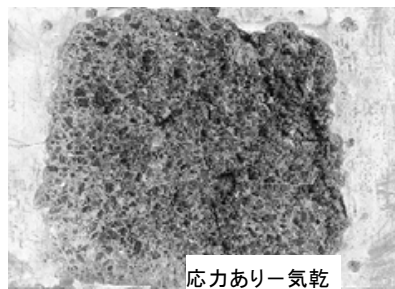
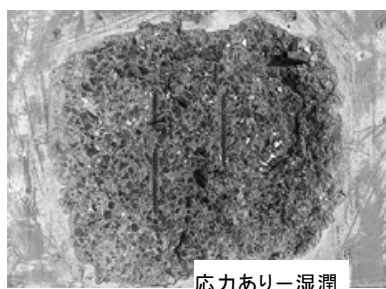


写真-2 爆裂面の状況

製した結果を図-8~10に示す。

試験体の主筋のかぶりは59mm、配筋筋は46mmであるが、爆裂深さは最大でも55mm程度であり、主筋まで達していなかった。爆裂が鉄筋位置で止まるメカニズムについては解明されていないが、海外においても同様な報告例がある<sup>2)</sup>。

図-8と図-10を比べると、圧縮応力が爆裂深さに影響することが分かる。爆裂現象はコンクリート中の水蒸気圧の上昇や温度膨張に伴う圧縮応力の増加等に起因するものと考えられている。

PC鋼棒による応力が作用しているほうが圧縮応力のレベルも相対的に高く、水蒸気圧も上昇する可能性がある。このことが爆裂深さが大きくなった一因とも推察される。ここで試験体に導入した13N/mm<sup>2</sup>という応力はセグメントの許容応力度に近い値であり、供用状態のセグメントにおいても同様のレベルの応力が作用している部分も存在すると考えられる。

図-8と図-9を比較すると含水率の影響を見ることができる。気乾状態の試験体のほうが爆裂深さは小さくなっている。爆裂現象には前述のようなメカニズムが考えられ、水分量の多寡が発生する水蒸気圧のレベルの差につながり、爆裂深さに影響したものと考えられる。

#### 4. 温度勾配実験

爆裂は表面温度だけではなく、温度上昇勾配の影響を強く受けるといわれている。そこで試験体表面の温度上昇勾配を変化させ、6時間の長時間加熱を行った。

##### 4.1 コンクリート表面温度の制御

本来であれば耐火炉を制御してコンクリートの表面温度を一定温度勾配で上昇するようにコ

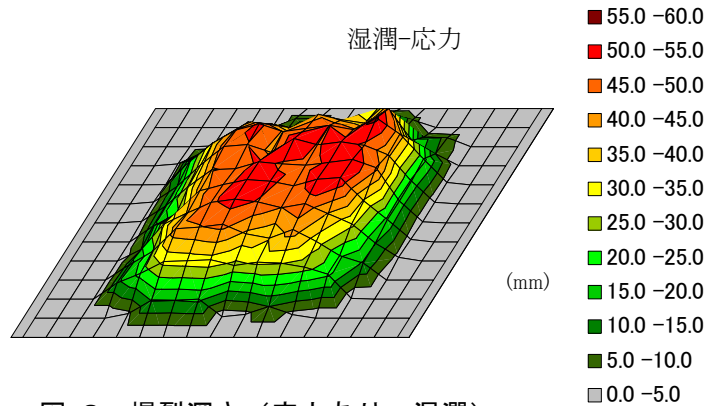


図-8 爆裂深さ (応力あり-湿潤)

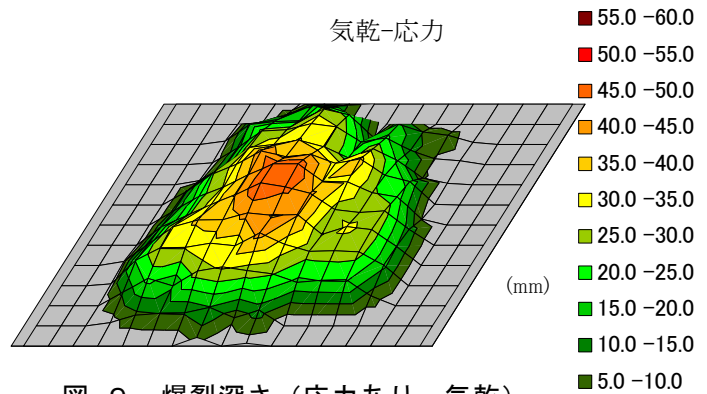


図-9 爆裂深さ (応力あり-気乾)

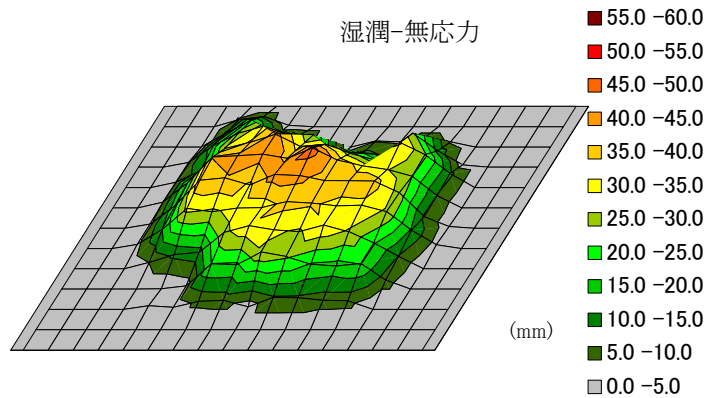


図-10 爆裂深さ (応力なし-湿潤)

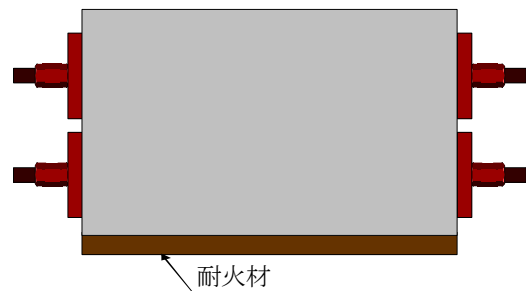


図-11 温度勾配測定用試験体



ントロールすべきであるが、ガスの燃焼を微妙に制御することは困難である。そこで図-11 に示すように試験体の加熱面に耐火材を貼り、その厚さを変化させてコンクリートの表面温度上昇勾配を制御することとした。その際、時間温度曲線には図-12 に示す ISO 曲線を採用した。これは曲線の形状が RABT 曲線に比べなだらかであり、コンクリート表面における一定温度勾配を達成しやすいためである。

#### 4.2 試験水準

温度勾配、応力レベル、含水率等が爆裂に与える影響を見るために、表-3 に示すような合計 6 体の試験体を用いて実験を行った。

温度勾配が 300℃付近で 4℃/分および 2℃/分となるように事前に温度解析を行い、それぞれ 18mm および 28mm のセラミック系耐火板を用いた。加熱は 6 時間行った。

#### 4.3 温度履歴

図-13~14 に表面温度の履歴を示す。図で 100℃付近に温度が一定に推移している区間が存在するが、これは耐火材中の水分の気化熱の影響である。2℃/分に関しては勾配が若干小さいものの、ほぼ予想された軌跡を描いており表面温度は最終的には 500℃に達している。爆裂の発生に温度上昇勾配が影響するという報告<sup>1)</sup>があるが、今回の実験で得られた温度上昇勾配では爆裂は発生しなかった。

一方、4℃/分に関しては耐火材が厚すぎたため、温度上昇勾配が 300℃付近で 2.4℃/分と予定よりかなり小さくなってしまった。表面温度は最終的には 650℃程度まで達しているが、これも爆裂は生じなかった。以上のことから、温度上昇勾配がこれくらいの条件以下であれば、コンクリートの表面温度が 650℃以上に上昇しても爆裂は生じないことが今回の実験で確認された。これはコンクリート中の水分が徐々に外部に放散されるため、結果として爆裂を生じるほどの水蒸気圧に達しなかったも

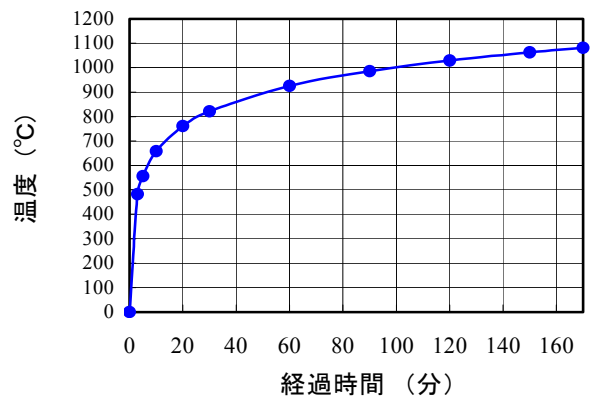


図-12 ISO 曲線

表-3 試験水準

温度上昇勾配 °C/分	応力レベル 13N/mm <sup>2</sup>		応力レベル 0N/mm <sup>2</sup>	
	含水率		含水率	
	湿潤	気乾	湿潤	気乾
2	○	○	○	---
4	○	○	○	---

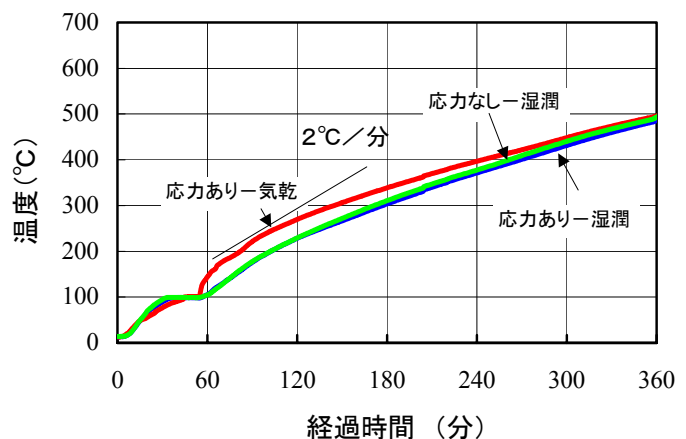


図-13 表面温度 (2℃/分)

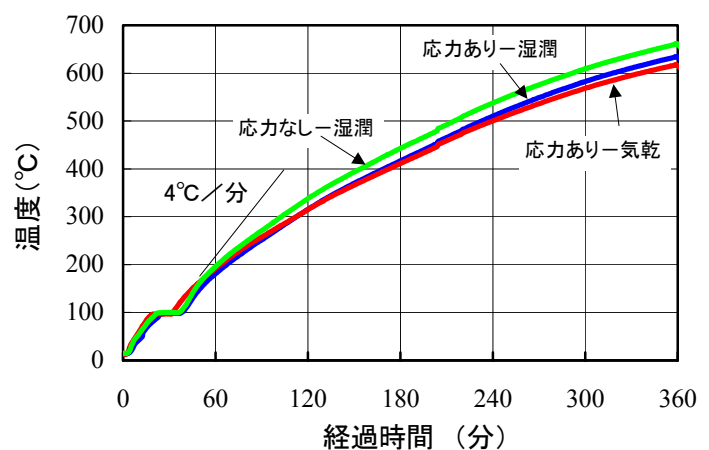


図-14 表面温度 (4℃/分)

のと考えられる。

## 5. AE センサーによる爆裂計測

今回の実験ではコンクリートの損傷を音響的に捕らえるために、図-15に示すような機器を用いAEセンサーによる測定を実施した。AEセンサーは極めて高感度であり、コンクリートに発生する亀裂などに伴う音響を捉えることができる。図-16に測定波形の一例を示す。縦軸は振幅であり、損傷に伴って発生する音響信号の大きさに比例する。音響信号と爆裂深さや面積との関係を定量的に把握するまでには至っていないが、損傷の発生した時期や数を特定することは可能である。ビデオによる観察では耐火材が吹き飛ばすような規模の爆裂はともかく、ポップアウトのような耐火材背面で起こる小規模な損傷は確認できない。今後は振幅やスペクトルにも着目して、損傷規模を定量的に推定できるようなレベルまで改良を加えていきたいと考えている。

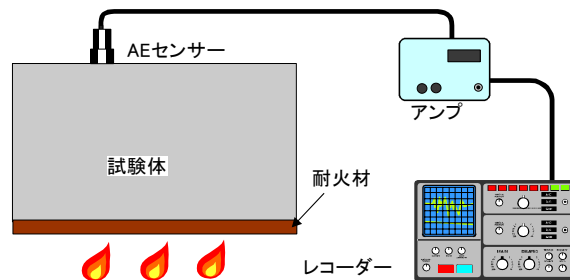


図-15 測定システム

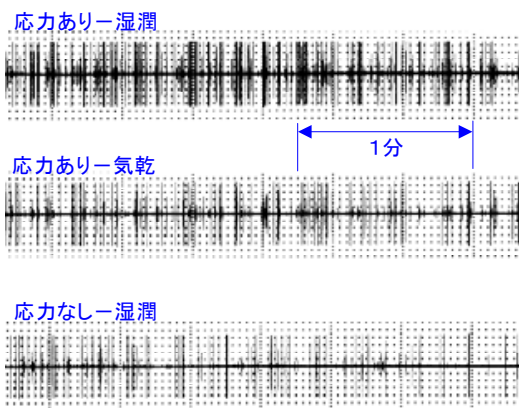


図-16 測定波形の例

## 6. おわりに

RCセグメントの高温時の挙動を把握するために耐火実験を行った。本研究で明らかになったことは以下のとおりである。

- 1) 耐火被覆のないRCセグメントはRABT曲線の下では激しい爆裂を生じる。しかしながら爆裂は配筋筋の深さで止まることが確認された。
- 2) 爆裂を生じたセグメントの鉄筋温度は800℃程度まで上昇するため、火災中の耐力の低下が懸念される。
- 3) 圧縮応力が作用するコンクリートは爆裂深さが大きくなる。
- 4) 含水率が高いほどコンクリートの爆裂深さは大きくなる。
- 5) 加熱中の温度上昇勾配が小さければコンクリートの表面温度が650℃程度になっても爆裂は生じなかった。
- 6) AEセンサーによりコンクリートの爆裂現象を時系列で捉えることができる。

今回の実験では、独立行政法人 建築研究所 防火・環境研究グループの遊佐秀逸グループ長に貴重なご助言を賜った。また実施に当たっては首都高速道路公団 田嶋仁志氏にご指導いただいた。末筆ながここに感謝の意を表する次第です。

## 参考文献

- 1) Both, C. : Safety Aspects of Tunnels, International Tunnel Fire & Safety Conference, Dec.1999, Rotterdam
- 2) EUREKA-Project EU 499: Fires in Transport Tunnels, Report on Full-Scale Tests, November 1995
- 3) Eurocode 4 - Design of Composite Steel and Concrete Structures, Part 1-2: General Rules - Structural Fire Design