

# 大断面TBMトンネルにおける シングルシェルRCライナーの設計・施工

Single-shell RC Liner Designed for Large Section TBM

森山守<sup>1</sup>・○大塚勇<sup>2</sup>・小原伸高<sup>3</sup>・領家邦泰<sup>4</sup>・小林伸次<sup>5</sup>

Mamoru Moriyama, Isamu Ohtsuka, Nobutaka Ohara,  
Kuniyasu Ryoike and Shinji Kobayashi

<sup>1</sup>学生会員 工修 中日本高速道路株式会社 清見工事事務所 (〒506-0101 岐阜県高山市清見町牧ヶ洞2447)

<sup>2</sup>正会員 工博 大成建設株式会社 土木本部土木設計部 (〒163-0606 東京都新宿区西新宿1-25-1)

E-mail:Ohtsuka@ce.taisei.co.jp

<sup>3</sup>正会員 工修 大成建設株式会社 土木本部土木設計部 (〒163-0606 東京都新宿区西新宿1-25-1)

<sup>4</sup>正会員 工博 大成建設株式会社 土木本部土木技術部 (〒163-0606 東京都新宿区西新宿1-25-1)

<sup>5</sup>非会員 大成・西松・佐藤工業共同企業体 (〒501-5627 岐阜県大野郡白川村大字萩町寺田3296)

The Hida Expressway tunnel, which is 10.7km long and has more than 1,000m overburden, was excavated by 12.84m diameter large section TBM.

The ordinary section bored by TBM consists of RC liner for support and in-situ concrete lining with 30cm thick. For the purpose of shortening working term, we adopted the single-shell structure that kept a function of lining in RC liner. This paper describes the design of the single-shell and the fireproof performance of the RC liner.

**Key Words :** tunnel boring machine, reinforced concrete liner, single-shell structure, fireproofing, organic fiber

## 1. はじめに

飛騨トンネルは、東海北陸自動車道と中部縦貫自動車道が連結する、飛騨清見ジャンクションから白川郷インターチェンジまでの間に建設中のトンネルである。本トンネルは延長10.7kmの長大トンネルで、かつ最大土被り1,000mを超える高土被りトンネルでもある。本坑の約4.3kmの区間は直径12.84mの大断面TBMで掘削を行った。TBM区間のD級地山の設計は、一次支保にRCライナーを用い、二次覆工は通常のNATMと同様に厚さ30cmの無筋の現場打ちコンクリートである。しかしながら、工期短縮を目的にTBM解体ヤード区間(約200m)では、一次支保のRCライナーに二次覆工の機能を持たせたシングルシェル構造を採用した。大断面トンネルにおけるシングルシェルは、国内の山岳トンネルでは初の試みである。そこで本報告ではシングルシェル構造として採用し

たRCライナーの設計について述べる。また、二次覆工の機能のうち耐火性については、コンクリートに有機短繊維(ポリプロピレン短繊維)を混入させ火災時のコンクリートの爆裂を抑制することで確保した。爆裂抑制型RCライナーを国内で初めて適用した。ここではRCライナーの耐火性能についても併せて述べる。

## 2. シングルシェルRCライナーの設計

### (1) シングルシェルRCライナー仕様の設定

表-1に一次支保とシングルシェルのRCライナーの仕様を示す。

鉄筋のかぶりについては、次章で述べる耐火性能から内空側を大きく確保することとし、鉄筋中心で75mmとした(一次支保のときは鉄筋中心で50mm)。

表-1 RC ライナーの仕様

| コンクリート | 設計基準強度       | 42N/mm <sup>2</sup> | 45N/mm <sup>2</sup>      |
|--------|--------------|---------------------|--------------------------|
|        | 厚さ           | 250mm               | 300mm                    |
| 鉄筋     | 材料           | SD345               | SD345                    |
|        | 被り<br>(中心位置) | 50mm                | 50mm (地山側)<br>75mm (内空側) |
|        | 配筋           | D16×7本 複鉄筋          | D16×7本 複鉄筋               |

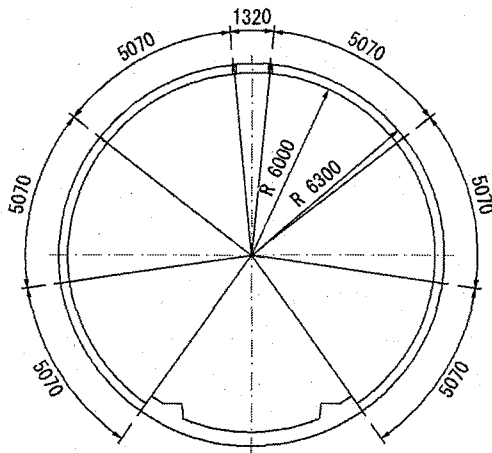


図-1 シングルシェルRCライナー配置図

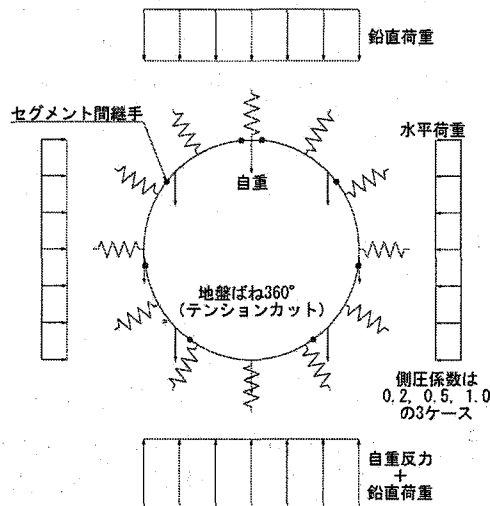


図-2 検討モデル

ライナー厚は、ライナーの緩み土圧に対する必要耐荷性能を満足するために300mmとし、コンクリートの設計基準強度を42N/mm<sup>2</sup>から45 N/mm<sup>2</sup>にした。1リングを形成するライナー間の継手（いわゆるセグメント継手）は、ボルトボックスと継手板を短ボルトで締結する、シールド工法におけるセグメントで一般に用いられている形式とした。また、インバートライナーの形状が一定であるため、ライナーの組み方はいわゆるいも組とした。また、シングルシェルで防水シートがないため、シールド工法におけるセグメントで一般に用いられている水膨張シール材により止水性を確保することとした。図-1にシング

表-2 検討ケース

| ケース | セグメント継手部 | 側圧係数 |
|-----|----------|------|
| 1   | 剛（継手無し）  | 0.2  |
| 2   | 回転ばね     |      |
| 3   | 剛（継手無し）  | 0.5  |
| 4   | 回転ばね     |      |
| 5   | 剛（継手無し）  | 1.0  |
| 6   | 回転ばね     |      |

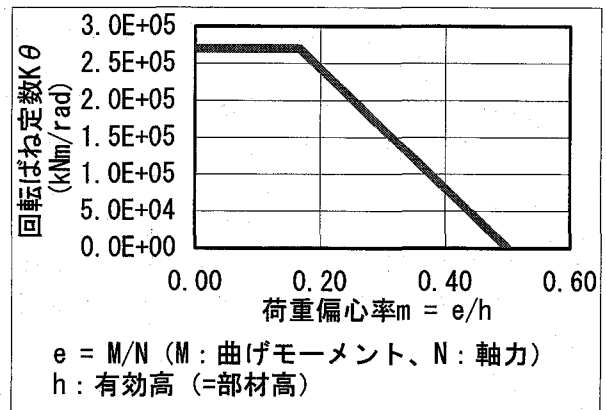


図-3 ライナー間継手の回転ばね定数

ルシェルRCライナー配置図を示す。

## (2) 構造解析

本検討ではRCライナーを梁、地盤をばねでモデル化する梁ばねモデルによる構造解析を実施し、RCライナーの応力度照査を行った。考慮する荷重は完成時の荷重状態を考慮し、自重、自重反力、緩み土圧による鉛直荷重および水平荷重とした。山岳トンネルの掘削では切羽到達時点である程度の初期応力が解放されている。さらに本トンネルの場合は無支保の状態でTBMの機体長分（約7.8m）以上の掘削が行われることや、比較的ルーズな豆砂利による裏込め充填が機体通過後に行われることから、ライナーに作用する地山の荷重は初期応力からは相当低下すると考えられる。以上の考察からRCライナーに作用する荷重は掘削解放力ではなく緩み土圧とした。緩み土圧は、緩み高さをTBM径の13m程度と設定し、鉛直荷重で300kN/m<sup>2</sup>とした。側圧係数についてはK=0.2, 0.5, 1.0の3ケースを検討した。検討モデルを図-2に示す。

検討ケースを表-2に示す。安全側を考えライナー間継手を剛構造としたケースと回転ばねにしたケースの両方のモデルで検討した。

図-3に示すように回転ばね定数は荷重偏心率に依存する値として設定するため、軸力が卓越する（荷

表-3 地盤反力係数

|      | 変形係数<br>( $\text{kN/m}^2$ ) | 層厚<br>(m) | 換算変形係数<br>( $\text{kN/m}^2$ ) | 基礎幅<br>(m) | 奥行<br>(m) | $\alpha$ | 換算載荷幅<br>(m) | 地盤反力係数<br>( $\text{kN/m}^3$ ) |
|------|-----------------------------|-----------|-------------------------------|------------|-----------|----------|--------------|-------------------------------|
| 裏込め材 | 4.77E+03                    | 0.21      | 5.00E+04                      | 12.50      | 1.00      | 4        | 3.54         | 1.05E+05                      |
| 地盤   | 5.00E+05                    | 37.29     |                               |            |           |          |              |                               |

モーメント図

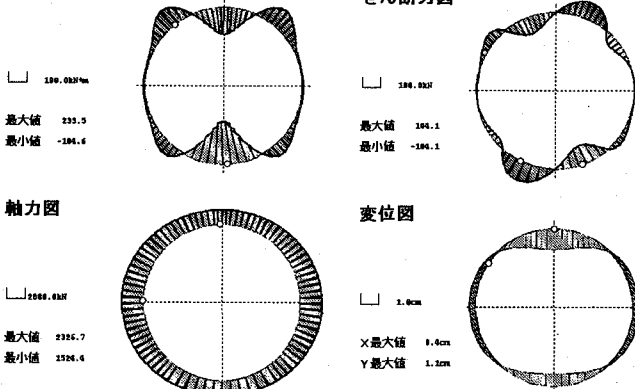


図-4 ケース1 断面力図

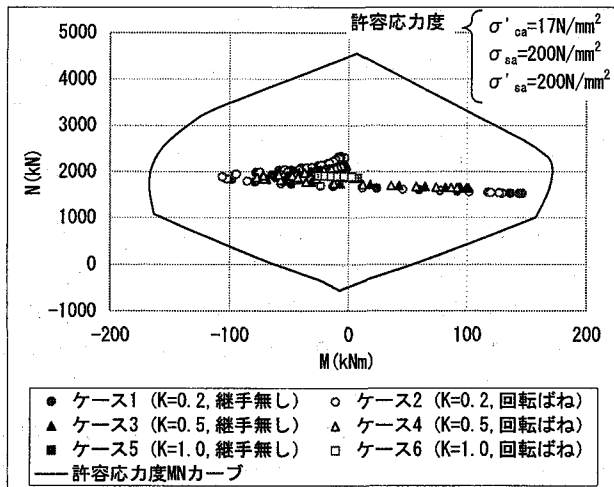


図-5 曲げモーメントおよび軸力に対する照査

重偏心率が小さい) ときはばね定数が大きくなり、曲げモーメントが卓越する(荷重偏心率が大きい)ときはピン構造に近くなる。

地盤反力係数は示方書<sup>1)</sup>の算出式により決定した。変形係数は裏込め材の影響を考慮した換算変形係数を用いた。ここで、裏込め材の変形係数は緩い砂質土相当とし、地盤の変形係数はD I パターンの標準値<sup>2)</sup>とした。表-3に地盤反力係数を示す。

### (3) 構造解析・応力度照査結果

図-4にケース1の断面力図を示す。全ケースの曲げモーメントおよび軸力に対する照査結果を図-5に示す。曲げモーメントおよび軸力に対する照査は許容応力度MNカーブに断面力をプロットすることにより行った。各ケースを比較すると側圧係数0.2のケー

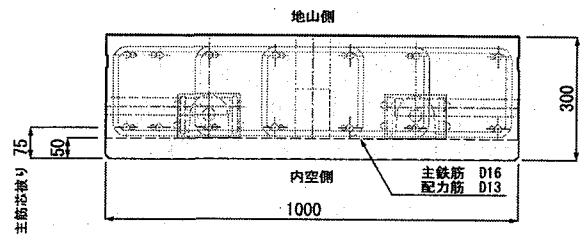


図-6 爆裂抑制型 RC ライナー断面図

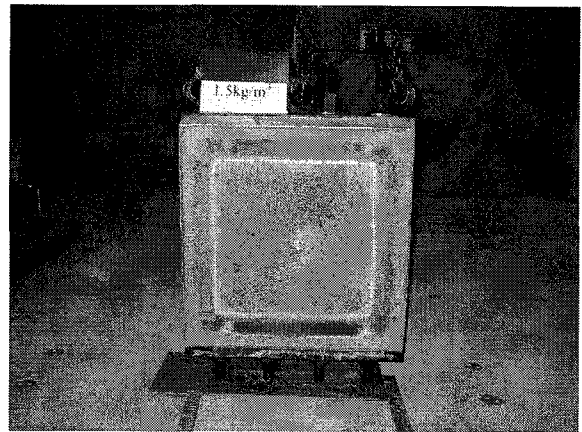


写真-1 加熱後試験体(一般部①)

スが最も厳しくなり、ライナー間継手については剛(継手無し)としたケースで断面力が大きくなる。いずれのケースも許容応力度照査を満足した。せん断力に対する照査は最大せん断応力( $\tau_m$ )と補正したコンクリートの許容せん断応力度( $\tau_a$ )を比較したが、全ケースで許容応力度照査を満足した。

## 3. シングルシェルRCライナーの耐火性能

### (1) 耐火構造の選定

一般に都市部の道路シールドトンネルで使用されるセグメントは、トンネルの立地条件から火災事故がトンネル内および地表部に重大な影響を及ぼす可能性があるため、耐火構造が要求されると考えられる。しかし、飛驒トンネルはこれとは異なり、岩盤中のいわゆる山岳工法トンネルであることを考えれば、地山によるトンネル構造の自立性(構造安定性)が期待でき、火災時も爆裂による覆工の大きな損傷がない限りは、トンネル断面はある程度保持され、トンネルの崩壊には至りにくいものと考えられる。従って、国内の道路シールドトンネルで実績のある、セグメントの内面に耐火被覆を設置する耐火構造<sup>4)</sup>と同等の性能までは必要ないものと考えられ、有機繊維混入コンクリートによる爆裂抑制型RCライナーを用いることにより二次覆工と同等の耐火性を確保できると考えた。火災時の要求性能は、トンネル内での大規模火災を想定して、火災想定時間温度曲

表-4 耐火試験体一覧

| 試験体名 | 概要                                | ボルトボックス<br>の充填材 | 目的                                            | 観察・測定                                                         | 導入軸力                | シール材<br>(目開き) | コンクリート<br>圧縮<br>強度        | 含水<br>率     | 試験<br>結果                       |
|------|-----------------------------------|-----------------|-----------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|---------------------|---------------|---------------------------|-------------|--------------------------------|
| 一般部① | PP 混入<br>(1.5kgf/m <sup>3</sup> ) | —               | 設定した有機繊維<br>混入量が爆裂抑制<br>のために適当である<br>ことを確認する。 | ①コンクリートに爆<br>裂が生じないことを<br>確認する。                               | 17N/mm <sup>2</sup> | —             | 63.0<br>N/mm <sup>2</sup> | 3.60<br>wt% | 爆裂<br>なし                       |
| 一般部② | PP 混入<br>(1.2kgf/m <sup>3</sup> ) | —               | 有機繊維の混入量<br>が局所的に 20%減<br>となった場合の挙<br>動を把握する。 | ②部材深さ方向の温<br>度分布を測定し、残<br>存耐力算定の基礎デ<br>ータとする。                 |                     | —             |                           |             | 爆裂<br>なし                       |
| 継手部① | PP 混入<br>(1.5kgf/m <sup>3</sup> ) | 充填材①            | 火災がボルトボックスに<br>及ぼす影響を把握<br>する。                | ①ボルトボックスの<br>充填モルタルが火災<br>により著しい欠損せ<br>ず継手機能を防護す<br>ることを確認する。 | —                   | 有り<br>(0mm)   | 63.0<br>N/mm <sup>2</sup> | 3.60<br>wt% | 爆裂<br>なし                       |
| 継手部② |                                   | 充填材②            |                                               | ②火災時の継手金物<br>の温度履歴を確認す<br>る(参考)。                              | —                   | 有り<br>(0mm)   |                           |             | 充填<br>材が<br>一部<br>崩落           |
| 継手部③ |                                   | 充填材③            |                                               |                                                               | —                   | 有り<br>(0mm)   |                           |             | 爆裂<br>なし                       |
| シール① |                                   | —               | 火災後の止水機能<br>に関する補修計画<br>立案の基礎データ<br>とする。      | ①継手に目開きが生<br>じた状態で火災時の<br>シール材位置の温度<br>履歴を確認する。               | —                   | 有り<br>(2mm)   | 61.5<br>N/mm <sup>2</sup> | 3.57<br>wt% | シール材<br>位置<br>温度<br>100℃<br>以下 |

表-5 コンクリートの示方配合

| 設計基準強度<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | 粗骨材の<br>最大寸法<br>(mm) | スランブ<br>の範囲<br>(cm) | 空 気 量<br>の範囲<br>(%) | W/C<br>(%) | 細骨<br>材率<br>(%) | 単位量 (kg/m <sup>3</sup> ) |           |          |          |           |                  |
|--------------------------------|----------------------|---------------------|---------------------|------------|-----------------|--------------------------|-----------|----------|----------|-----------|------------------|
|                                |                      |                     |                     |            |                 | 水<br>W                   | セメント<br>C | 細骨材<br>S | 粗骨材<br>G | 混和剤<br>SP | 有機<br>繊維         |
| 45                             | 20                   | 16<br>±2.5          | 2.5<br>以下           | 36.5       | 52.0            | 177                      | 485       | 878      | 826      | 4.85      | 1.5<br>or<br>1.2 |

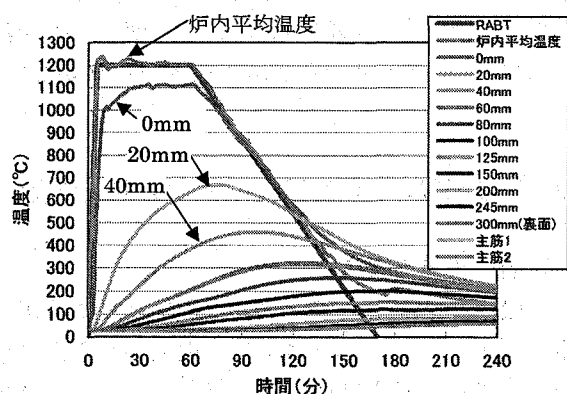


図-7 試験体内部温度と時間の関係 (一般部①)

線をRABT曲線 (60分加熱) としたときに、覆工コンクリートに爆裂が生じないこととした。爆裂防止型RCライナーの断面図を図-6に示す。

## (2) 耐火性能の確認試験

有機繊維混入 (ここではポリプロピレン短繊維を使用した) により爆裂を抑制するために必要な混入量を確認するために、RCライナーと同配合のコンクリート試験体 (800mm×800mm×300mm) を用いたRABT曲線による加熱を行う耐火実験を行った。また、継手部のボルトボックス充填モルタルの耐火性能や継手部の止水材 (水膨張ゴムシール材) が火

災時に熱劣化しないことを確認するために、継手部を模擬した試験体も製作し、同時に耐火実験を行った。加熱後の試験体を写真-1に示す。また、実施した耐火試験体の一覧を表-4に、コンクリート配合を表-5に示す。

実験結果より、今回選定したポリプロピレン短繊維の場合はコンクリートに1.5kg/m<sup>3</sup>混入することで爆裂を抑制できることが確認された。また、ボルトボックス充填モルタルも有機繊維を混入させることで爆裂が抑制されること、目開き2mmであれば、火災時のシール材の温度は一般に許容温度とされる100℃以下となることも確認された。

## (3) 火災時のRCライナーの構造安定性

火災時にはコンクリートや鉄筋が高温になることにより耐力が低下する。ここではRCライナーの火災時の構造安定性を以下の考え方により評価した<sup>5),6)</sup>。

①受熱温度が500℃以下のコンクリートの圧縮強度は、強度を設計基準強度の2/3とする。②受熱温度が500℃を超えるコンクリートの圧縮強度は、強度を零とし、断面計算に考慮しない。③受熱温度が500℃を超える部分を熱劣化深さと定義し、残存曲げ耐力は熱劣化深さがかぶり厚さに達した時点で常温の半分とする。

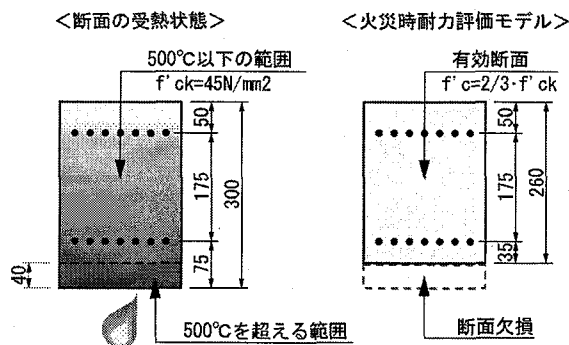


図-8 火災時の耐力評価モデル

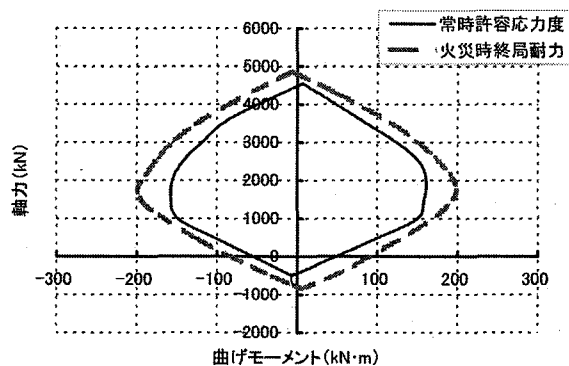


図-9 火災時想定残存耐力のMNカーブ

耐火実験における試験体内部の温度分布を図-7に示す。これによれば火災時の最高温度が500℃に達するのは内面側から約40mmの深さである。従って、火害を受けた後に補修することをふまえて鉄筋のかぶりを決定し、火災時の構造安定性を確保するため、火災時終局耐力が常時許容応力度相当のNMカーブを上回るようにRCライナーを設計した。図-8に火災時のモデル図を、図-9に検討結果を示す。火災時終局耐力が常時許容応力度相当のNMカーブを上回る結果となった。

#### (4) 有機繊維混入コンクリートの製造管理

RCライナーの製造管理は、コンクリート製造時の有機繊維混入量のばらつきがないことを管理することとし、初期の製造実績をもとに洗い試験による品質管理方法を策定した。

#### 4. シングルシェルRCライナーの施工

RCライナーの組立て開始時には、1目目のRCライナーの真円度、勾配（立ち）、方向を正しく組み立てるために、基準リングを設置した。

また、テープのついたライナープレートを用いて、蛇行修正を行った。

RCライナーの施工完了状況を写真-2に示す。



写真-2 RCライナーの施工完了状況

#### 5. おわりに

大断面トンネルでは国内初の試みとなるシングルシェル構造について、RCライナーの仕様を決定し構造解析によりその妥当性を確認した。

二次覆工省略型の道路トンネルでは耐火工が必要となるが、良好な地山中のトンネルの場合は、地山の安定性を期待することができるため、有機繊維混入コンクリートを用いた爆裂抑制対策も耐火工の選択肢として考えられる。

本報告が今後の類似計画の参考になれば幸いである。

謝辞：本工事の検討に際してご指導頂きました飛驒トンネル施工技術検討委員会（委員長：京都大学名誉教授 足立紀尚殿）の皆様感謝致します。

#### 参考文献

- 1) (社)日本道路協会：道路橋示方書 I 共通編・IV下部構造編，2002.
- 2) 日本道路公団：試験研究所技術資料第358号トンネル数値解析マニュアル，1998.
- 3) (社)土木学会：トンネル標準示方書 [シールド工法編]・同解説，1996.
- 4) 西岡巖，由利一，小原伸高：道路シールドトンネルにおける耐火工の施工計画および施工実績、土木学会第61回年次学術講演会，6-604，pp.127-128，2006.
- 5) (社)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、pp.76-78、2004.
- 6) 国土交通省住宅局建築指導課：2001年版 耐火性能検証法の解説及び計算例とその解説、pp.205-208、1997.