

# 表面き裂を有する鋳物部材の熱伝導シミュレーション解析

今谷 勝次\*

## 【要 旨】

鋳物構造物の基本的な変形特性を把握した上で、熱伝導解析と応力解析を結合して実施し、背面き裂の有無を判定できる可能性を解析的観点から見出した。マンホール表面の一部に適切な熱量を与え、断面内での非定常な温度分布を利用することで曲げ変形を誘起させ、さらに表面変位の変動を解析することによって、き裂の有無が判定される。また、比較的複雑な表面の化粧模様にも対応できることを示した。

## 1 はじめに

マンホールカバーは、その製造時に要求される品質は保証されるものの、品質維持のための措置や基準は特に定められてはいない。我が国には十万基を超えるマンホールが設置されており、施設後に数十年を経過するものも少なくない。マンホールカバーが破損した場合には、基本的には設置者である企業体（水道、ガス事業者など）に責任が生じ、また不具合を放置した場合には道路管理者の不作为も問題となる。

本研究では、有限要素法を用いた熱伝導および熱応力解析に基づいて、鋳物構造物の表面（背面）き裂探傷に関する解析を行い、実現可能な簡易な探傷手法について検討した。表面から熱を与えて熱変形（膨張）を誘起させ、それに伴う熱応力を利用することによって、背面に存在するき裂を推定できることがわかった。さらに、この手法を実装するための課題を抽出した。

## 2 マンホールカバーの変形特性とシナリオ策定

### 2.1 マンホールの構造強度

まず表面中央部の500x200mm領域において垂直下方に10tonの荷重を与えることで、マンホールカバーの基本特性を把握した。三角柱要素によって総節点数108,709、要素数177,504の解析対象を作成し、応力解析に供した。縦弾性係数 $E=150\text{GPa}$ 、ポアソン比 $\nu=0.3$ としている。Fig.1は対象構造物の相当応力分布の鳥瞰図であり、図中の斜線部に10tonの荷重を与えている。このとき、最大のたわみは中心部で約0.15mm程度となり、最大のミーゼス相当応力は背面のリブ上で約35MPa程度となった。鋳鉄にも様々な種類があり、降伏応力/耐力にもそれに応じて様々な値を用いるが、一般的に

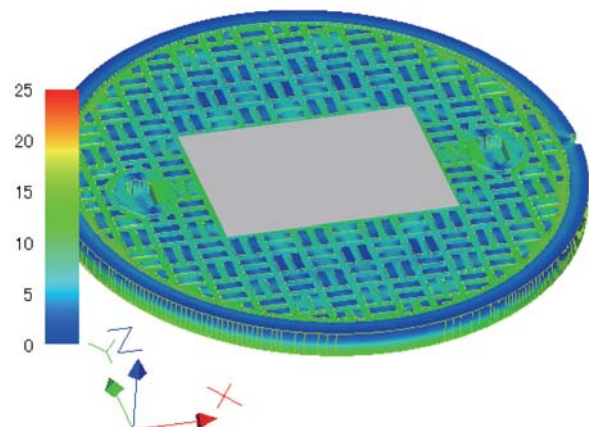
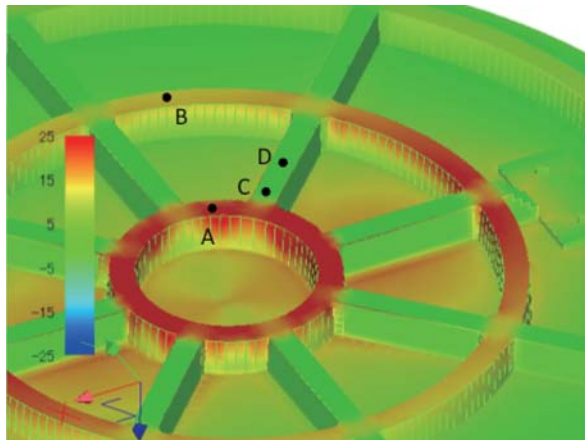
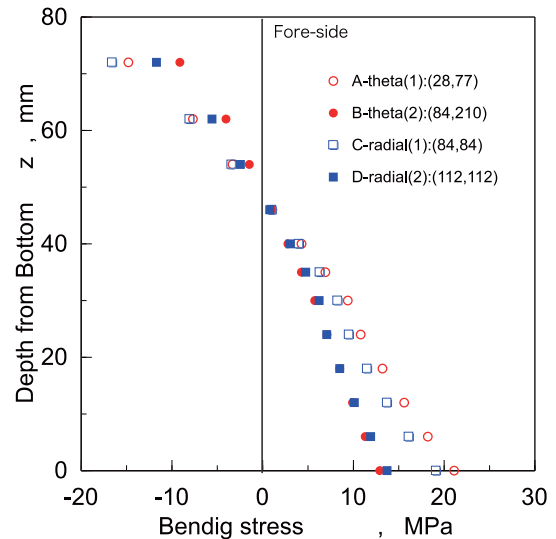


Fig.1 試験荷重での相当応力分布

\* 京都大学大学院エネルギー科学研究科  
准教授



(a) Tangential stress distribution in back side



(b) Bending stress along cross-section

Fig.2 10tonの試験荷重におけるマンホールカバーの変形特性

はこの鋳構造に70ton以上の負荷を加えても破損／崩壊に至らないことは明らかである。すなわち、マンホールに対して要求される構造物としての強度は十分に有していると言える。

Fig.2(a)は背面における円周方向応力の分布を示している。内側リブの表面に最大値が表れる。Fig.2(a)に示した特定の4点における断面の曲げ応力分布をFig.2(b)に示す。円周方向のリブの点A, Bについては円周方向応力の成分  $\sigma_\theta$  を（このとき  $\sigma_r$  は小さい）、半径方向のリブの点C, Dについては半径方向応力成分  $\sigma_r$  を示してある（このとき  $\sigma_\theta$  は小さい）。マンホールカバーの変形は、曲げ変形が支配的であり、背面のリブによって構造の強度を確保していることがわかる。これらのことから、以下の結論が得られる。

- (1) 応力が最大となる一番内側の円周方向リブからき裂が生じる可能性が高い。
- (2) リブにおけるき裂発生と伝ばは、構造にとって致命的である。

## 2. 2 熱伝導／応力結合解析

マンホールカバーが破損に至るには、一番内側の円周方向リブからき裂が生じると考えるのが合理的である。そこで、正常な構造（Level-0）と比較して、内側の円周方向リブにき裂が入った構造（Level-1）、内側のリブの両方にき裂が入った構造（Level-2）、内側のリブから中間の円周方向リブにき裂が伝ばした構造（Level-3）（Fig.3参照）を考え、それぞれのモデルに対して熱伝導解析とその結果を用いた熱応力を解析した。以下のメカニズムによって、き裂を推定できる可能性がある。

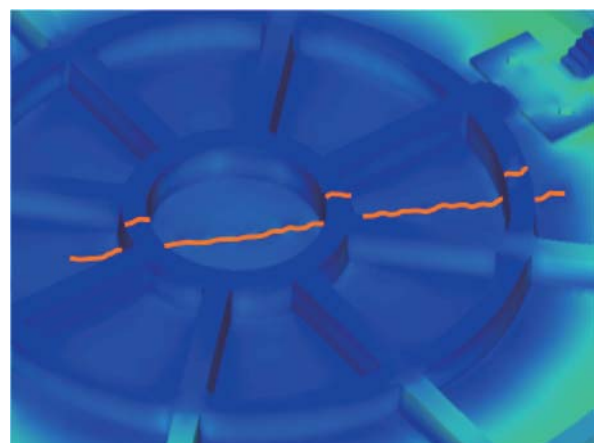


Fig.3 背面き裂の導入

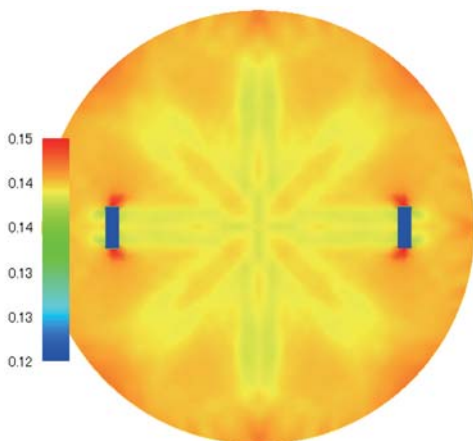
- (1) 表面中央の適当な領域（ここではφ560mm）に熱量を与える。その他の表面／背面は、自然な熱伝達境界とする。
- (2) マンホールカバーの表面から熱すると、断面において擬似的に指数関数状の温度分布となることが期待される。
- (3) カバーは曲げ変形を基本変形のモードとしているから、かかる非定常熱伝導における膨張に対して、表面で圧縮、背面で引張りの熱応力が生じる。
- (4) 背面にき裂が存在することによって、曲げ剛性が低下し表面でのひずみ分布やたわみが異なってくる。  
ここでは曲げ変形の効果を促進させるために、場合によっては表面の外径φ700、内径φ600の円環状に負荷1 tonを加えることとする。

### 3 解析結果と検討

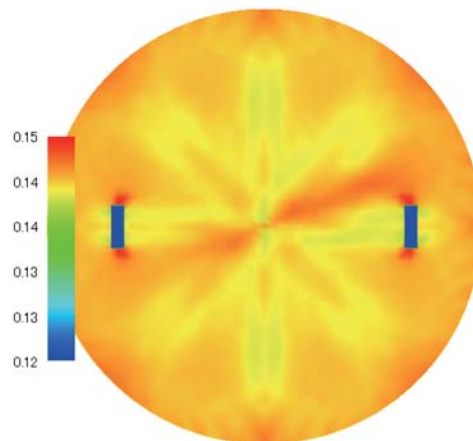
まず上述のメカニズムを検証する。簡単のために、マンホールカバー表面に複雑な模様を施さず、かつ表面全体に適当な熱量を与えて熱伝導／応力解析を行い、背面き裂の有無が表面に現れるかどうかを検討した。負荷は作用させていない。Fig.4(a)はLevel-0での円周方向ひずみ分布であり、

Fig.4(b)はLevel-3における円周方向ひずみ分布を表している。明らかに背面き裂による差異が生じていることがわかる。

次に表面に与えられた凹凸模様を施した場合の結果を示す。加熱では中央部のφ560mmに熱量を与え、2 minで表面の最高温度が150℃程度になるように熱量を設定した。円周方向ひずみ分布をFig.5 (Level-3) に示す。表面の化粧模様によってひずみ分布がかき消されてしまっている。そこで、化粧模様に左右されにくい表面底での点を代表点として19x19点とり、そこでのたわみ量を内挿することによって連続な変動量とし、空間スペクトルを解析することによってLevel-0からLevel-3までのたわみの空間周波数の変化を調べることとした。Fig.6はき裂進展に伴う半径r=63mm、123mにおける周波数成分1と2の変化を表している。健全なLevel-0でのスペクトル強度は、Level-1のそれとほとんど同じであった。き裂が進展するにしたがい成分1の円周方向のスペクトル強度が大きくなる。このことは、たわみの円周方向での変動が大きくなることに対応している。半径方向でのスペクトル強度のばらつきと総合して判断することで、き裂をおよそ把握できることになる。健全な構造物のスペクトルパターンからのずれを見出すことで、



(a) Tangential strain (%) in Level-0 cover



(b) Tangential strain (%) in Level-3 cover

Fig.4 簡易モデルによるき裂推定の検証

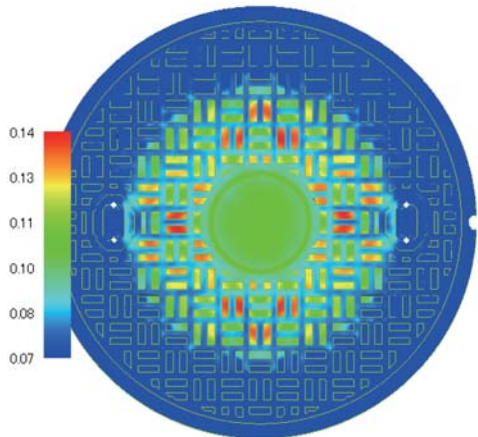


Fig.5 詳細モデルによるひずみ分布結果

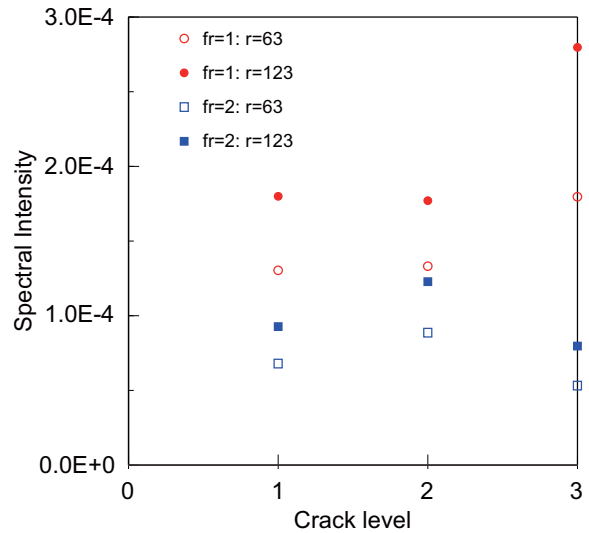


Fig.6 たわみのスペクトル強度の変化

き裂の検出が可能となる。

#### 4 おわりに

熱伝導解析と応力解析を組み合わせることによって、背面き裂検出を試みた。ここでとり上げた探傷原理の実装化について、コメントとともにまとめておく。

- (1) ここでは非定常熱伝導の断面で温度分布を利用しているが、せん断膨張ひずみ（熱ひずみ）は弾性ひずみに比べて大きいため、温度差が大きければ大きいほどよいわけではない。背面で円周方向応力が引張りとなるように、適切に設定

する必要がある。実際の加熱についても様々なばらつきがあり、それらを考慮する必要がある。

- (2) 設置した後、数十年も経過した構造物を対象とする限り、対象そのものの寸法／材質／欠陥など様々なばらつきだけでなく、摩耗など経年変化を考慮する必要がある。

- (3) 以上のような観点から、様々なばらつきを考慮に入れて数値計算でデータベースを作成しておき、スペクトル分布のパターンの変化からき裂の位置を同定することが可能であると考えられる。ただし、き裂の深さなどの詳細な情報を推定することは容易ではない。