

鋳物製品の強度評価

機械金属室 羽地 龍志 國吉 和男
 渡嘉敷一輝* 吉嶺 全博*
 呉屋 守章**

1. 緒言

県内で生産されている鋳鉄鋳物にはマンホール鉄蓋、グレーチング、上下水道関連製品、その他生活に密着した多種にわたる製品がある。マンホール鉄蓋は、そのほとんどが道路上に設置され、地下に埋設された施設と地上の道路とを結ぶ唯一の門扉であり、地下埋設の設備機械の保護カバーであると同時に、道路の一部としても極めて重要な役割を持つ。最近における道路状況は、産業の発展充実、自動車工業の発展と共に大きく変化しており、車両交通量の増大、大型重量車両の増加、スピードの増大などによって道路に及ぼす影響は甚だ過酷で、製品の高強度化・高品質化が要求されるようになった⁽¹⁾。このような背景を踏まえ、製品設計段階において種々の理論強度計算がされているが、製品の静荷重試験における実測たわみ値と理論計算値には開きが見られる。

本研究はマンホール鉄蓋モデルを用いて実荷重試験を行うことにより、理論計算値と実荷重試験値との開きの直接的要因あるいは理論計算時に考慮されなかった他パラメータを究明し従来の簡易設計法⁽²⁾に反映することを目的とするものである。

2. 実験材料および実験方法

図1にマンホール鉄蓋製品の静荷重試験時の強度を推定するために作製した簡易鉄蓋(モデル1~3)、製品鉄蓋(モデル4)および受枠を示す。4種類の鉄蓋モデルを8枚ずつ作製した。溶解炉(2 ton炉)の容量上、一度に全てのモデルを鋳込むことが困難であったため、FCD600相当の化学成分になるように調整した8チャージの溶湯(溶湯No. 1~No. 8)を用いた。各チャージから各モデルを1枚ずつ鋳込んだ。各溶湯の化学成分測定の結果、表1に示すような測定値の範囲に入っていた。

表1. 溶湯の化学成分

C	Si	Mn	P	S	Cu	Mg
3.8518~ 3.6694	2.4724~ 2.4025	0.5556~ 0.5454	0.0332~ 0.0262	0.0106~ 0.0075	0.2516~ 0.2473	0.0538~ 0.0455

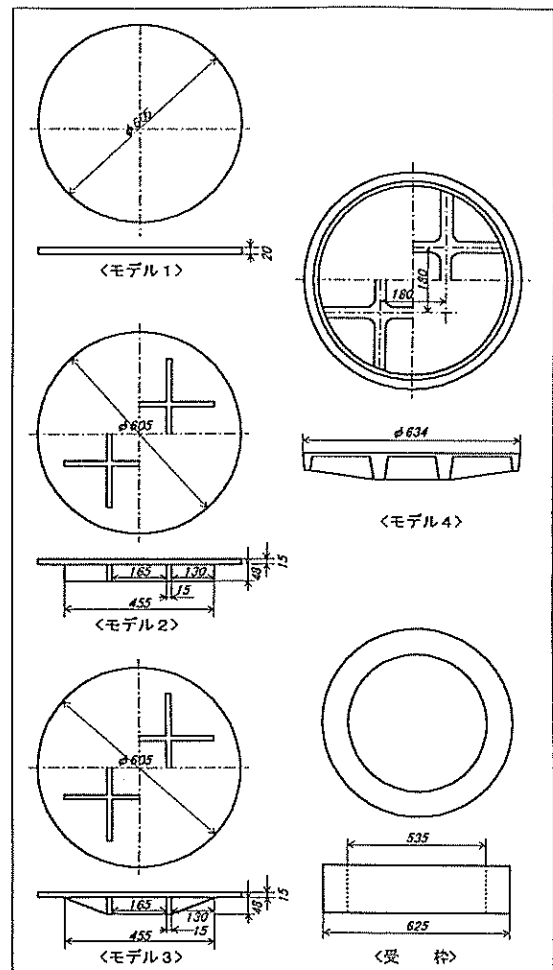


図1 簡易鉄蓋モデルおよび受枠形状

* 琉球大学工学部エネルギー機械工学科

** 琉球大学工学部機械システム工学科

2.1 ヤング率測定および硬さ試験

各チャージ毎に鉄蓋モデルおよび各種試験片作成用 Y ブロックを 3 本鑄込み、引張試験片および硬さ試験片を作製した。

島津万能試験機 UH-30A を用いて軸方向に4.9kN(0.5ton)から34.3kN(3.5ton)まで段階的に引張荷重を加えたときの、荷重と軸方向伸び（標点距離50mmに対する変位量）からヤング率を算出した。鑄鉄は一般にじん性が低く引張試験時の変形量（伸び）が微少で実測することが困難であったことから、変位量を電圧に変換して測定を行った。

耐水ペーパー #600による研磨後、ブリネル硬さ試験を行った。

2.2 組織観察および球化率測定

引張試験前の試験片のつかみ部から厚さ約10mmの組織観察用試験片を切断し、バフ研磨を施した後、組織観察および画像処理装置 SPICCA-ACE を用いて球化率測定を行った。

2.3 引張試験

ヤング率測定に用いた引張試験片を島津万能試験機 UH-F1000kNC を用いて引張試験を行った。

2.4 マンホール鉄蓋モデル実荷重試験

モデルと受枠とのがたつきを除去するため、モデルと受枠との接触面に機械加工を施した後、図2に示すJIS A 5506に基づいた静荷重試験を、島津万能試験機 UH-F1000kNC を用いて以下の手順で行った。

- 1)受枠上にモデルを載せる。
- 2)モデルの上部中心に良質のゴム板（厚さ6mm、中央部約φ50mmの穴有）を載せる。
- 3)ゴム板の上に鉄製載荷板（φ330mm*50mm）を置く。
- 4)載荷板の上に鉄製やぐらを置き、その間に測定最小単位0.01mmのゲージを、針がモデル中央表面に接触するように両端をマグネットベースを固定して支持する。
- 5)ゲージの目盛りを0にする。
- 6)製品モデルの場合、受枠とモデルとのがたつきを防止するために、あらかじめ試験荷重と同一荷重を加え、受枠にモデルが食い込む様にする。
- 7)試験荷重を加える。
- 8)所定の荷重に達したときのゲージの値を読み取り、たわみ量を記録する。
- 9)荷重を徐々に除去する。
- 10)以上の手順を3回繰り返す。

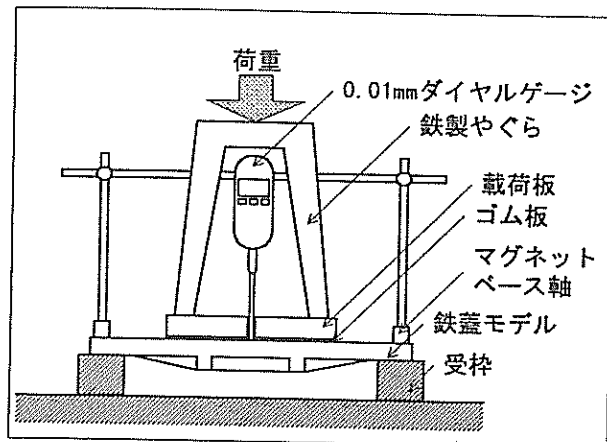


図2 実荷重試験概略

2.5 等価曲げ剛性の導入

従来の簡易設計法は、リブ付円形マンホール鉄蓋中央部のたわみを求めるためTimoshenkoの式

1 (図3参照) を使用している。

$$w = \frac{P}{8\pi D} \left[b^2 \ln \frac{b}{a} + \frac{3+\nu}{2(1+\nu)} (a^2 - b^2) \right] - \frac{Pa^2 H_2}{2D(1+\nu)} + 0.00315 \frac{B_s P}{\pi b^2 D_1} \quad (式1)$$

D, D_1 : 曲げ剛性 a : 蓋半径 b : 載荷半径
 ν : ポアソン比 P : 荷重 M : 円周モーメント

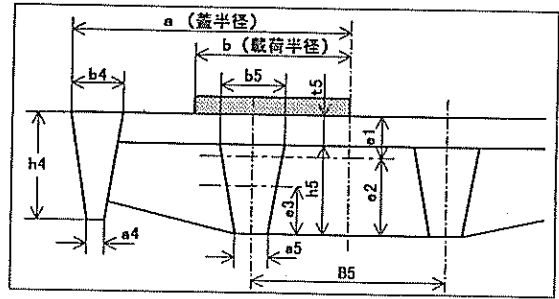


図3 マンホール鉄蓋製品概略

式1では、円板を補強するためのリブの曲げ剛性を軸対称円板の曲げ剛性に直接適用しているため、リブを含めたマンホール鉄蓋全体の曲げ剛性は実際と比べて過大評価となり、リブ付マンホール鉄蓋に関する強度評価は適正でないと考えた。従って、軸対称でないリブの曲げ剛性を軸対称として考慮するために、「等価曲げ剛性」を導入した。図4に等価曲げ剛性の概念および概略図を示す。

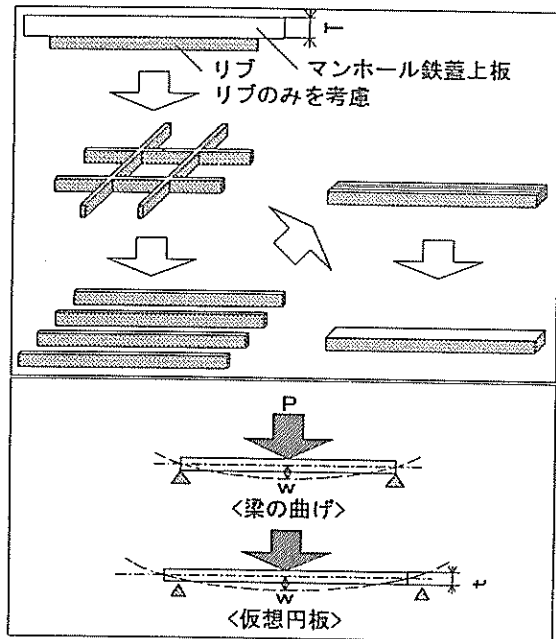


図4 等価曲げ剛性の概念

- 1) 円板を補強するためのリブに注目し、4本のリブを1本の梁と考える。
- 2) 荷重Pを負荷することによって梁に生じるたわみをwとする。
- 3) 荷重Pを負荷したときに梁と同じ量のたわみwを生ずる仮想的な円板を考える。
- 4) 仮想円板の厚みtを求める。

上記1)~4)の手順により、リブ付き円板を、仮想円板の厚みtとリブ上部の円板の厚みTを加えた、厚み(t+T)のリブ無し円板に置き換える。

円板に荷重が作用するとき生じるたわみを求める式2 (図5参照) を用いてたわみ量を求め、これを理論値とする。

$$w = \frac{P}{16\pi D} \left[\frac{\nu+3}{1+\nu} a^2 - \frac{7+3\nu}{4(1+\nu)} b^2 + 4b^2 \log \frac{b}{a} \right] \quad (式2)$$

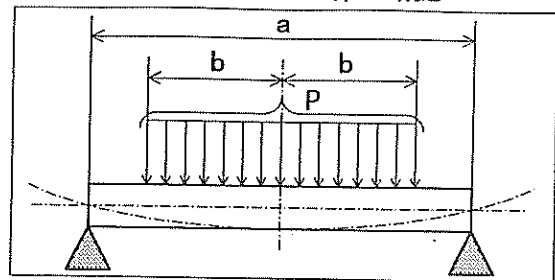


図5 同心円内に平等分布荷重を受ける周縁自由支持の円板のたわみ

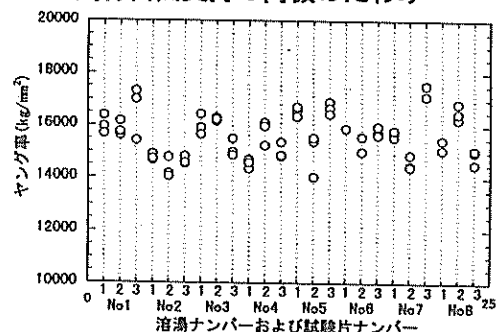


図6 ヤング率測定結果

3. 結果および考察

3.1 ヤング率測定結果および硬さ試験結果

各溶湯からそれぞれ3本のYブロックを鑄込み、ヤング率を測定した結果を図6に示す。

有意水準 $\alpha=0.05$ としたときのヤング率の平均値は $15599.10 \pm 330 \text{ kg/mm}^2$ 、また、標準偏差 σ は 794.34 kg/mm^2 であった。ブリネル硬さ試験の結果は180~211 (HB3000)で、JISのFCD500相当の硬さ (170~241HB3000)であった。

同一溶湯および各種溶湯におけるヤング率測定値のばらつきの原因として以下の点について検討を行った。

3.1.1 同一溶湯におけるばらつき

- ①溶湯作製時、るつぼ内において、球状化促進剤のMgをはじめとする諸化学成分が十分に攪拌されなかった可能性がある。
- ②各Yブロックの冷却速度の相違によって不均一な状態の内部組織が生じた。

3.1.2 各溶湯間におけるばらつき

- ①各溶湯の注湯温度が異なっていた可能性がある。
- ②各溶湯の化学成分が異なることから、組織形成に影響を及ぼす主要五元素 (C, Si, Mn, P, S) および球状化を促進するMgなどの化学成分とヤング率の相関係数 r を求めた。その結果、 $r = -0.28 \sim 0.22$ となっており、ヤング率に影響を及ぼす特定の化学成分は見られなかった。

3.2 組織観察および球化率測定結果

同一試験片における内部組織観察写真を図7(a)および(b)に、また、各溶湯から3個ずつ作製した組織観察用試験片の5視野において測定した球化率の平均値を図8に示す。図7(a)は試験片中央部に見られた球状黒鉛鑄鉄の正常な組織、(b)は試験片表層部の組織である。

一般に鑄鉄の組織は、同じ化学成分でも冷却速度に左右されやすい⁽⁴⁾とされており、また3.1における考察から、注湯温度や冷却速度が組織生成に及ぼす影響は大きい。

3.3 引張試験結果

図9に引張試験結果を示す。引張強度は、min 551.6~max609.3MPaであった。

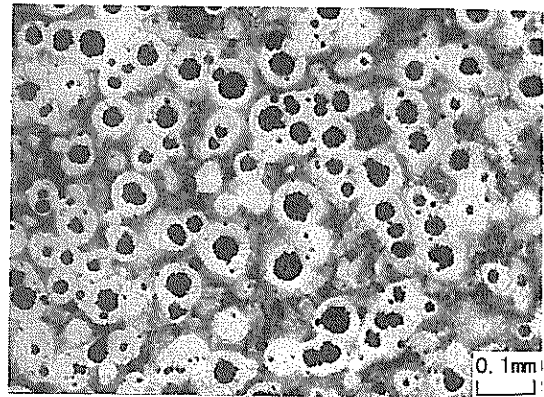


図7 (a) 組織観察写真 (試験片中央付近)

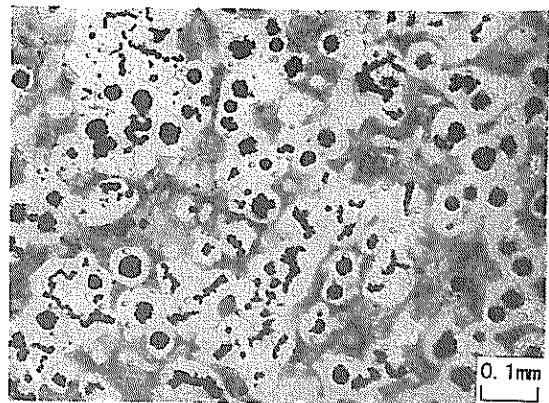


図7 (b) 組織観察写真 (試験片表層付近)

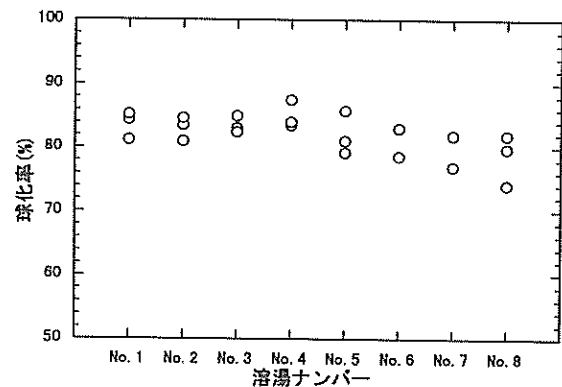


図8 球化率測定結果

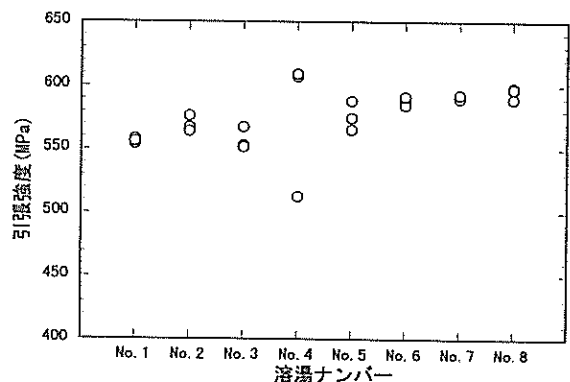


図9 引張試験結果

3. 4 マンホール鉄蓋モデル実荷重試験結果

図10～図13に実荷重試験結果を示す。測定に際し、モデルと受枠とのがたつきや、万能試験機定盤と受枠とのがたつきなどを除去するために、モデル1に対して初期荷重1kNを負荷後、30kNまで段階的に負荷してたわみを測定した。また、モデル2、3およびモデル4に対しては初期荷重1kNを負荷後、50kNまで段階的に負荷した。図10に示す線は、ヤング率を $15599.10\text{kg}/\text{mm}^2$ としたときの円板に対する理論計算結果で、図11に示す線はリブ付きモデル（モデル2）に対して等価曲げ剛性を導入した結果である。

図10におけるたわみの実験値は、理論計算結果よりも小さく、各モデル間のばらつきが見られる。また図11における実験値は理論計算結果よりも大きくなっている。このことから、等価曲げ剛性を導入してリブ付きマンホール鉄蓋を円板に置き換えて行う理論計算は、たわみを実測値よりも過小評価してしまうことがわかる。これは等価曲げ剛性を導入する際、「リブの配置に関する影響を考慮しない」ことを仮定としていることが原因の一つと考えられることから、仮定の検討を重ねる必要がある。また、リブ付きモデルの場合、モデル上部の円板に、冷却時に生じたと思われるひげが見られるなど円板の厚みは一定でなかった。たわみを求める（式2）中で、モデルの厚みは3次の変数となっていることから厚みの不均一による影響は極めて大きいと思われる。

図11（モデル2：リブ傾斜無）および図12（モデル3：リブ傾斜有）において、リブ形状がたわみに及ぼす影響を調べるために、同一溶湯におけるたわみ量の差の検定（ $\alpha=0.05$ ）を行った。その結果、溶湯No.2およびNo.4の2溶湯は、試験荷重の設定範囲内（0～50kN）ではたわみに有意差が見られなかった。より詳しくリブ形状の影響を調べるために、載荷面積、設定試験荷重値の拡大など、試験条件を検討する必要がある。

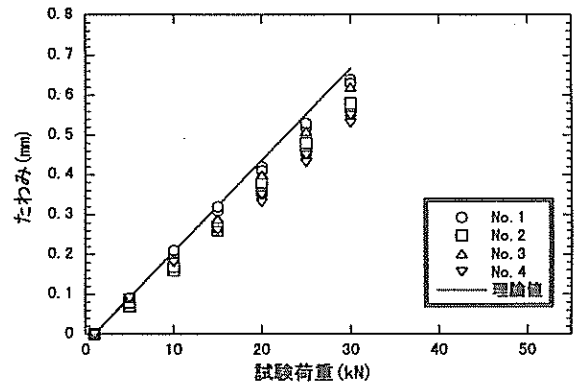


図10 実荷重試験結果（モデル1）

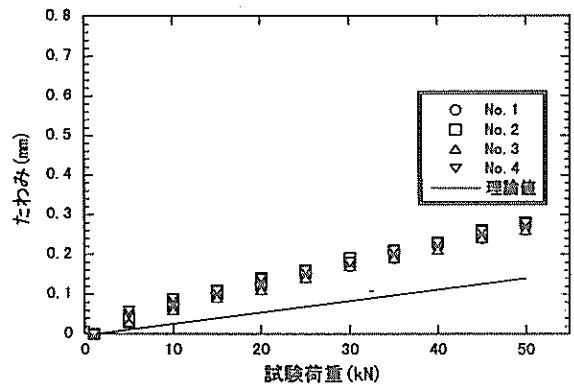


図11 実荷重試験結果（モデル2）

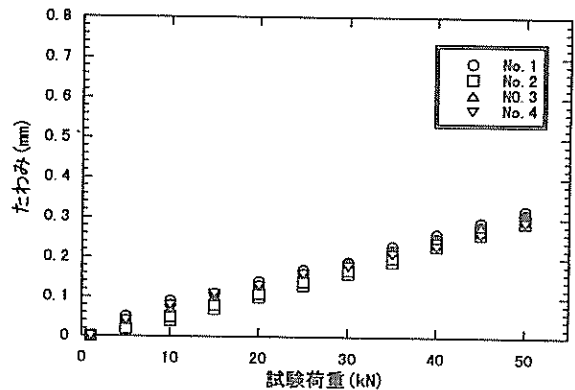


図12 実荷重試験結果（モデル3）

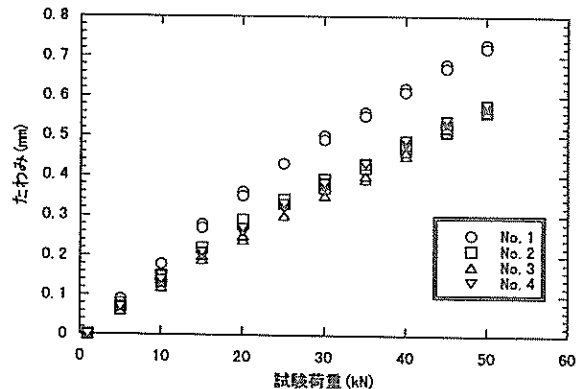


図13 実荷重試験結果（モデル4）

図13における測定値は各溶湯間のたわみの差が見られる。これは、モデル4（製品モデル）の場合、他モデルと比較して、①円板部分の厚みが薄い②リブ形状が複雑である③モデル上部の円板に模様が施されているなど、モデルの構造による影響が要因の一つであると考えられる。

4. 結 言

等価曲げ剛性を用いた理論計算値は、実荷重試験値よりもたわみ量を過小評価する結果であった。この原因として、等価曲げ剛性を導入する際にリブの配置による影響を考慮していないことなどが挙げられる。また、リブ形状（傾斜の有無）に関する影響をより詳しく調べるために、載荷面積、設定試験荷重値等試験条件を検討する必要がある、今後の検討課題である。

参考文献

- (1)新鉄蓋 日乃出水道機器株式会社
- (2)マンホール鉄蓋設計計算書・那覇市仕様 (T-25) 沖縄鋳鉄工業株式会社
- (3)若い技術者のための機械・金属材料 矢島悦次郎・市川理衛・吉沢浩一共著 丸善株式会社
- (4)材料力学 浅岡照夫・松原典宏・小久保邦雄共著 東京電機大学出版局
- (5)板とシェルの理論 (上) チモシェンコ・ヴォアノフスキクリーガー共著 ブレイン図書
- (6)材料力学 上巻 戸口英善・川田雄一・倉西正嗣共著 株式会社裳華房
- (7)材料力学公式集 湯浅亀一 他共著 コロナ社
- (8)化学者および化学技術者のための統計的方法 石川馨・藤森利美・久米均共著 東京化学同人
- (9)すぐわかる統計解析 石村貞夫著 東京図書

編 集 沖縄県工業技術センター

発 行 沖縄県工業技術センター

〒904-2234 沖縄県うるま市字州崎 12 番 2

T E L (098)929-0111

F A X (098)929-0115

U R L <https://www.pref.okinawa.lg.jp/site/shoko/kogyo/>

著作物の一部および全部を転載・翻訳される場合は、当センターにご連絡ください。