

新日本製鐵（株） ○ 正会員 羽上田 裕章  
正会員 柳本 速雄

## 1. 緒言

我が国の導水路トンネルは、1920年代～1950年代に建設されたものが多い。これらのトンネルの中には、トンネル寿命などから改修が必要となってきたものが多く見られる。

このような老朽化トンネルの改修工法として、トンネル内面に沿って鋼板を内張する工法がある。既設トンネルによって外周が拘束されている鋼板内張構造の外圧に対する崩壊荷重を算定することは、接触問題等の非線形問題を解くことになり、容易ではない。そのため、崩壊荷重算定に際しては、設計者の判断に頼るところが大きかった。そこで、筆者らは汎用性に富んだ内張鋼板の崩壊荷重算定のためのFEMを用いた解析システム（図-1）の構築を試みた。ここでは、その成果について報告する。

## 2. 鋼板内張構造の解析モデルの設定

本解析で対象とする鋼板内張構造の断面形状は、図-2に示すように、円形断面と馬蹄形断面の2タイプとする。鋼板内張構造の特長は、鋼板の外周が既設トンネルによって拘束されていることにある。既設トンネルの外周拘束効果により、内張鋼板は、外圧に対して外周拘束が無いものに比べて数倍の耐荷力が期待できる。したがって、数値シミュレーションを用いて内張鋼板の耐荷力を算定するためには、既設トンネルと内張鋼板との接触状況を忠実に再現することが必要である。そのため、解析モデルとして、内張鋼板を表現する梁要素の周辺に隙間を表すことが可能なバネ要素を配置したものを用いる。また、構造及び外力の対称性から、図-3に示すように解析モデルは1/2モデルとし、支持条件として端部には鉛直変位のみを発生を許したローラー支持、インバート部急角部には内張鋼板の法線方向変位を固定した傾斜支持を用いる。

本解析手法は、等分布の外圧を徐々に増加させる荷重制御の大変形弾塑性の有限要素法を用いた数値解析である。

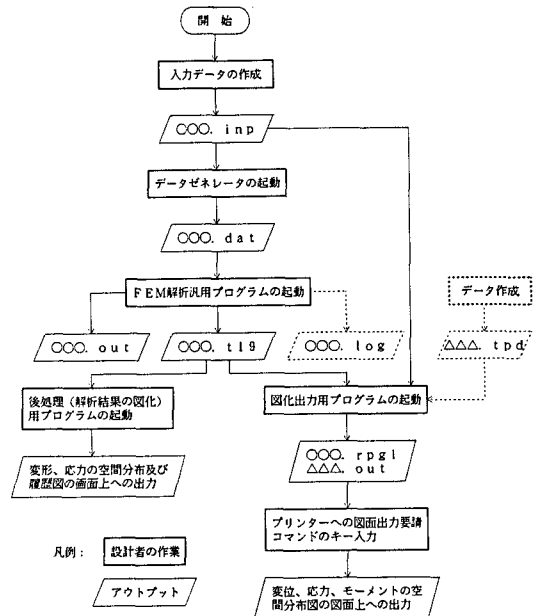


図-1 解析システム

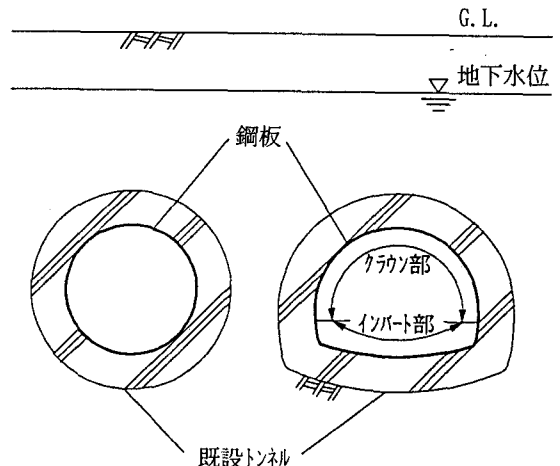


図-2 鋼板内張構造

### 3. 解析結果及び考察

#### （1）円形断面に対する数値解析値の検証

数値解析の信頼性を検証するため、図-3、表-1に示すモデルを対象に行った解析結果と外周が拘束されている円管の外圧に対する崩壊荷重算定の理論解であるAmstutz理論との比較を行った。その結果、図-4に示すように数値解析解はAmstutz理論解の約94～99%の値であり、数値解析は崩壊に至るまでの挙動を正確に追跡できることを確認した。

#### （2）馬蹄形断面に対する数値解析値の検証

曲率の異なる4連弧アーチからなる馬蹄形鋼板内張構造に対する数値解析の信頼性を検証するため、図-5、表-2に示すモデルを対象に行った解析結果と模型実験結果との比較を表-3に示す。模型実験に使用した供試体の形状、隙間には不整、計測誤差等があるものの、数値解析解は実験結果の約91～120%となっており、馬蹄形内張鋼板に対しても数値解析は崩壊挙動を正確に追跡できることを確認した。

### 4. 結語

本解析手法が荷重制御であるため、崩壊時及び崩壊後の挙動は追えないものの、荷重制御であるが故に、崩壊モードを予測することなく、比較的容易に大変形弾塑性のFEM解析で崩壊荷重近傍までの内張鋼板の挙動を追いき求めることができることを確認した。今後、本解析システムを設計に適用することにより、設計作業の効率化が期待できる。

最後に、本開発に当たり、御指導を賜りました吉田教授（東工大）に深謝の意を表します。

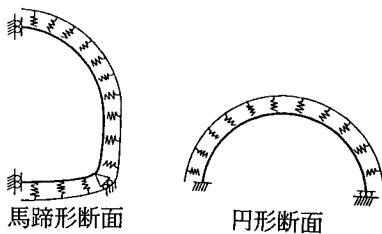


図-3 解析モデル

表-1 円形鋼板モデルの諸元

| 円弧<br>番号 | 曲率半径<br>(cm) | 板厚<br>(cm) | 開口角<br>(deg) | 要素分割 |
|----------|--------------|------------|--------------|------|
| 1        | 225.75       | 1.50       | 180          | 90   |

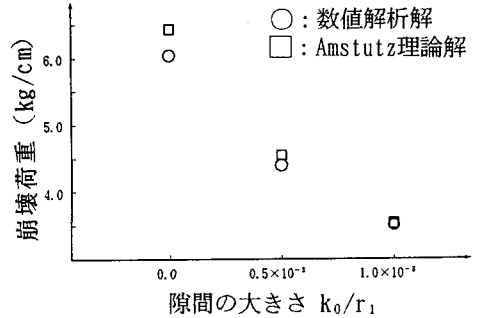


図-4 数値解析と理論解との崩壊荷重の比較  
—円形鋼板内張構造—

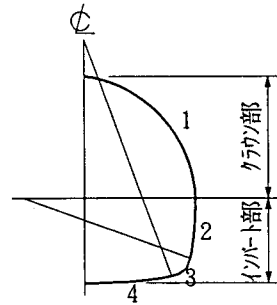


図-5 馬蹄形鋼板の形状

表-2 馬蹄形鋼板モデルの諸元

| モデル | 半 径<br>r (cm) | 板 厚<br>t (cm) | 開口角<br>2α (deg) | 要素分割<br>n | 隙間量<br>k <sub>0</sub> (cm) |
|-----|---------------|---------------|-----------------|-----------|----------------------------|
| A   | 1 39.1        | 0.23          | 90.0            | 45        | 0.53                       |
|     | 2 78.2        | 0.23          | 11.8            | 11        | 0.53                       |
|     | 3 5.0         | 0.23          | 52.3            | 10        | 0.53, 0.00                 |
|     | 4 78.2        | 0.23          | 25.9            | 24        | 0.00                       |
| B   | 1 39.3        | 0.16          | 90.0            | 45        | 0.47                       |
|     | 2 78.6        | 0.16          | 11.6            | 11        | 0.47                       |
|     | 3 5.0         | 0.16          | 51.9            | 10        | 0.47, 0.00                 |
|     | 4 78.6        | 0.16          | 26.5            | 24        | 0.00                       |
| C   | 1 39.3        | 0.16          | 90.0            | 45        | 0.19                       |
|     | 2 78.6        | 0.16          | 11.6            | 11        | 0.19                       |
|     | 3 5.0         | 0.16          | 51.9            | 10        | 0.19, 0.00                 |
|     | 4 78.6        | 0.16          | 26.5            | 24        | 0.00                       |

表-3 数値解析と模型実験との崩壊荷重の比較  
—馬蹄形鋼板内張構造—

| モデル | 崩壊荷重(kg/cm) |      |
|-----|-------------|------|
|     | 数値解析        | 模型実験 |
| A   | 0.300       | 0.27 |
| B   | 0.156       | 0.17 |
| C   | 0.205       | 0.17 |