

# ライナープレートの標準的な設計法に関する研究

## STUDY ON STANDARDIZING DESIGN METHOD OF LINER PLATES

神田大<sup>1)</sup>・小泉淳<sup>2)</sup>

Hiroshi KANDA, Atsushi KOIZUMI

Because of the lack of the fundamental test data, the current design method of liner plate structures depends on the impracticable or only theoretical calculation. Therefore there exists some differences in their point of view between each makers. Accordingly, the design method needs to be standardized. This study refers to several loading tests and analyses of liner plates and their structures. Their available ratios of bending stiffness are attempted to reveal by the tests. Consequently, the Beam-Spring Model can simulate the behavior of structures of liner plates in a good accuracy.

**Key Words:** liner plate, bending stiffness, Beam-Spring Model

### 1. はじめに

ライナープレートは鋼板に波付け加工し、四辺にフランジを設けた構造部材であり、1892年に米国において初めて製造された。元来トンネルの覆工材として開発されたものであり、ブタペストやシカゴの地下鉄に使用された。その後、軽量であること、内側から組立てが可能であることなどの施工の優位性が認識されるに従い、下水道などの立坑や深礎の仮設土留め材として、また、集水井や集水用の横坑などの構造部材としても使用されてきている。誕生以来100年、日本への導入から約40年が経過したわけであるが、現行のライナープレートの設計法は、設計者の判断に依存する割合が大きい。これは過去の基礎実験のデータが乏しいこと、実験等による検証を伴わない机上の理論計算のみで設計が行われていることに基因している。また最近では大型化や異形化が進んできているにもかかわらず、その設計は従来の設計法の延長上で行っている。このためライナープレートの設計法は、各メーカーそれぞれの考え方によって異なる部分が多いのが実情である。このような状況から、コルゲート・ライナー技術協会では各社の技術的見解を明確にし、設計法および施工法を統一してマニュアル化する作業を現在進めている。

本論文はライナープレートの設計・施工マニュアルに反映させる基礎データを得る目的で、ライナープレートの単体曲げ試験、継手曲げ試験およびリング載荷試験を行い、ライナープレートの単体の曲げ剛性を実験的に把握するとともに、継手部の存在によるリング全体の曲げ剛性の有効率などに検討を加えたものである。

### 2. ライナープレートの単体曲げ試験

#### 2. 1 試験の概要

1) 学生会員 早稲田大学大学院理工学研究科

2) 正会員 工学博士 早稲田大学理工学部土木工学科

表-1 ライナープレートの諸元

|                                    |       |
|------------------------------------|-------|
| 板厚 $t$ (mm)                        | 2.67  |
| 幅 $B$ (mm)                         | 500   |
| 桁高 $h$ (mm)                        | 55.2  |
| ヤング係数 $E$ (kN/mm <sup>2</sup> )    | 210   |
| 断面積 $A$ (cm <sup>2</sup> )         | 19.66 |
| 断面二次モーメント $I_0$ (cm <sup>4</sup> ) | 69.73 |

表-2 試験ケース

| 試験ケース | 半径 $R$ (mm) | 中心角 $\theta$ (°) | $L_1$ (mm) | $L_2$ (mm) | $h/R$  |
|-------|-------------|------------------|------------|------------|--------|
| case1 | 1000        | 90               | 600        | 1414.2     | 0.0552 |
| case2 | 2000        | 45               | 600        | 1530.7     | 0.0276 |
| case3 | 3000        | 30               | 600        | 1552.9     | 0.0184 |
| case4 | 4000        | 22.5             | 600        | 1560.7     | 0.0138 |
| case5 | 5000        | 18               | 600        | 1564.3     | 0.0110 |
| case6 | —           | —                | 600        | 1570.0     | —      |

単体曲げ試験はライナープレートの曲げ剛性を実験的に把握することを目的に行ったものである。

試験には半径が 1000mm, 2000mm, 3000mm, 4000mm, 5000mm の円弧形状のライナープレートおよび直線形状のライナープレートを用いた。試験はそれらのライナープレート単体の支間中央に、載荷幅 600mm の 2 線荷重を鉛直に載荷するものである。表-1 に試験に用いたライナープレートの諸元を示す。図-1 は試験の概要を示したものである。測定項目は、スパン中央部における波形の凹凸部に発生するひずみ(2 点)および鉛直変位(1 点)であり、それぞれひずみゲージおよび変位計を用いて測定した。試験ケースは表-2 に示すとおりである。なお、同一形状のプレートについてそれぞれ 2 体ずつ試験を行っている。

## 2. 2 試験結果の整理および理論値との比較

試験結果を整理するにあたっては曲げ剛性の有効率  $\eta_0$  の概念を導入し、 $\eta_0 EI$  なる曲げ剛性をもつはりのスパン中央部における応力度および鉛直変位をそれぞれ式(1)および式(2)を用いて理論的に求め、 $\eta_0$  をパラメータとして、1～0.5 まで 0.1 きざみでこれを変化させ、試験値と同値となる  $\eta_0$  を逆算した。ヤング係数  $E$  は鋼に固有のものであるからこの  $\eta_0$  は断面二次モーメントの有効率を意味している。式(1), (2)中の  $I_0$  (69.73cm<sup>4</sup>) は全断面有効の場合の断面二次モーメントである。また鉛直変位についてはライナープレートの桁高  $h$  と半径  $R$  との比  $h/R$  がすべてのケースで 1/10 より小さいことから、直線はりともなして理論値を算出した。なお、試験結果は最小自乗法を用いて載荷荷重 10kN のときの値に換算している。

$$\text{応力度: } \sigma = \frac{M}{I} y = \begin{cases} \frac{M}{\eta_0 I_0} y_i & \text{: 引張側 (+ 符号)} \\ -\frac{M}{\eta_0 I_0} (y_0 - t) & \text{: 圧縮側 (- 符号)} \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{鉛直変位: } \delta = \frac{P}{2} \frac{L_2^2 (L_2 - L_1)}{48 E \eta_0 I_0} \left\{ 3 - \left( \frac{L_2 - L_1}{L_2} \right)^2 \right\} \quad (2)$$

図-2 は曲げ剛性の有効率と変位との関係を示した一例である。表-3 は各試験ケースにおいて得られた  $\eta_0$  の値をまとめて示したものである。この表より、曲げ応力度から算出した  $\eta_0$  は引張側ではすべてのケースで  $\eta_0=1$  となっていることがわかる。また圧縮側では直線形状のライナープレートの場合を除き半径が大きくなるにつれて曲げ剛性の低下も大きくなる傾向が見られた。一方、鉛直変位から算出した  $\eta_0$  は半径が小さくなるにつれて  $\eta_0$  が小さくなる傾向、すなわち曲げ剛性の低下が大きくなる傾向が見られた。

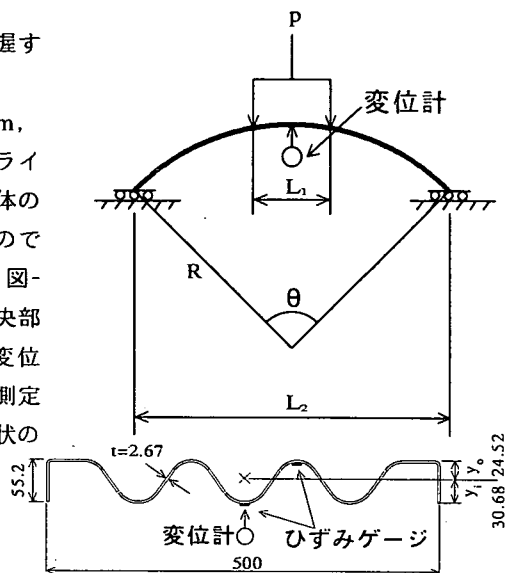


図-1 試験の概要

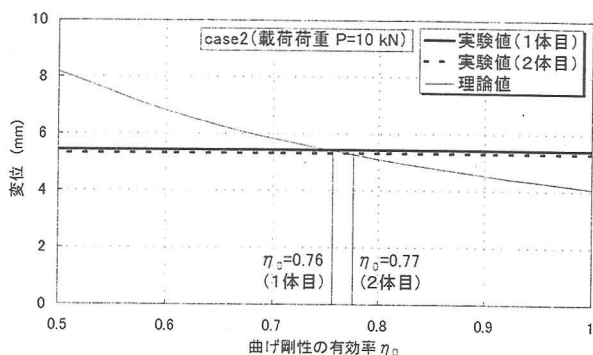


図-2 曲げ剛性の有効率と変位との関係(case2)

表-3 各試験ケースでの  $\eta_0$  の値

|                   |    |                                                             |
|-------------------|----|-------------------------------------------------------------|
| case1<br>(R=1000) | 変位 | $\eta_0=64\% \sim 76\%$                                     |
|                   | 応力 | 引張側 $\eta_0=94\% \sim 100\%$<br>圧縮側 $\eta_0=82\% \sim 85\%$ |
| case2<br>(R=2000) | 変位 | $\eta_0=76\% \sim 77\%$                                     |
|                   | 応力 | 引張側 $\eta_0=100\%$<br>圧縮側 $\eta_0=73\% \sim 77\%$           |
| case3<br>(R=3000) | 変位 | $\eta_0=78\% \sim 81\%$                                     |
|                   | 応力 | 引張側 $\eta_0=100\%$<br>圧縮側 $\eta_0=75\% \sim 78\%$           |
| case4<br>(R=4000) | 変位 | $\eta_0=83\% \sim 84\%$                                     |
|                   | 応力 | 引張側 $\eta_0=100\%$<br>圧縮側 $\eta_0=68\% \sim 76\%$           |
| case5<br>(R=5000) | 変位 | $\eta_0=80\% \sim 84\%$                                     |
|                   | 応力 | 引張側 $\eta_0=100\%$<br>圧縮側 $\eta_0=61\% \sim 65\%$           |
| case6<br>(直線)     | 変位 | $\eta_0=87\% \sim 89\%$                                     |
|                   | 応力 | 引張側 $\eta_0=100\%$<br>圧縮側 $\eta_0=80\%$                     |

### 3. 幅方向の変形を拘束したライナープレートの単体曲げ試験

#### 3. 1 試験の概要

実際に施工されるライナープレート構造物は、それを形成する単体の幅方向の変形は長手方向に連続するリングによって拘束される。そこで本試験は実施工時の状態を模擬したうえでライナープレートの曲げ剛性を把握しようと試みたものであり、幅方向のフランジを拘束した状況下でライナープレートの曲げ試験を行った。図-3に示すように、実験には $\phi 6$ の鋼棒を用いてライナープレートの幅方向の変形を拘束し、その支間中央に載荷幅 300mm の 2 線荷重を鉛直に載荷した。スパンは 1200mm としている。ライナープレートの諸元は表-1 に示すとおりであり、本試験には表-2 中の case6 と同じ直線形状のライナープレートを用いた。測定項目は、スパン中央部における波形の凹凸部に発生するひずみ(14点)および鉛直変位(7点)であり、それぞれひずみゲージおよび変位計を用いて測定した。

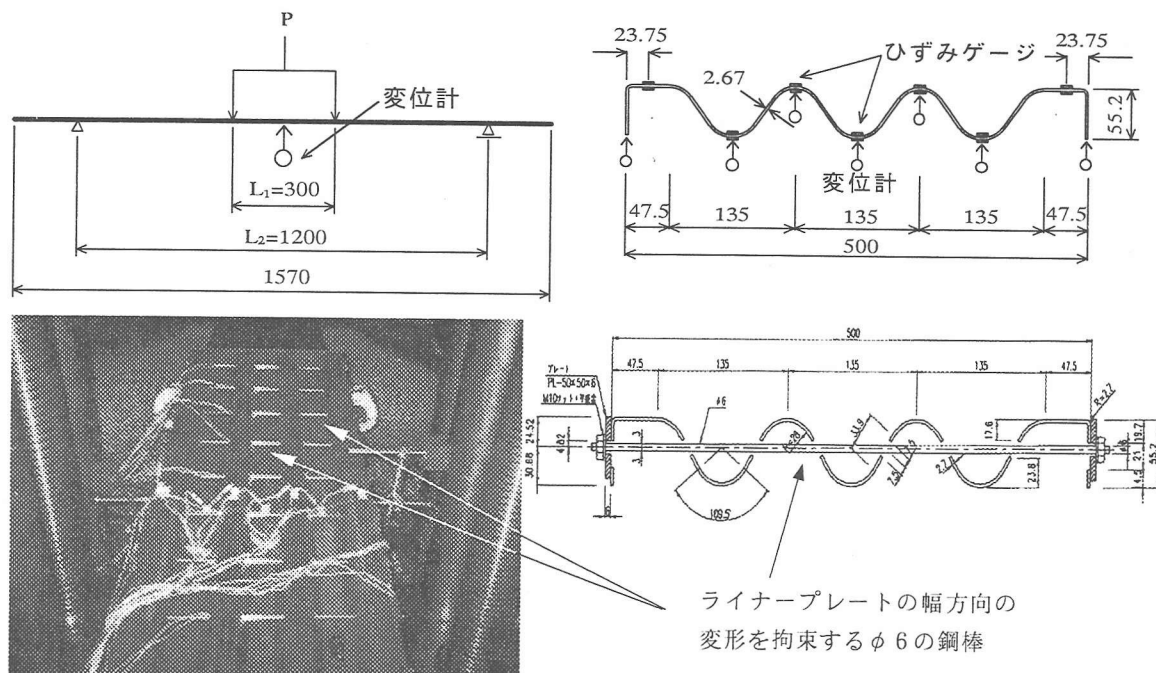


図-3 試験の概要

### 3. 2 試験結果の整理および理論値との比較

2. 2と同様の方法で試験結果を整理し理論値との比較を行った。

その結果、曲げ応力度から算出した $\eta_0$ は $\eta_0 > 1$ となり全断面を有効と考えてよいという結果が得られたが、鉛直変位から算出した $\eta_0$ は $\eta_0 = 0.84$ となることがわかった。図-4は例として曲げ剛性の有効率と変位との関係を示したものである。

なお、本試験で用いたライナープレートから幅方向の変形を拘束するための鋼棒を取り除いた状態で曲げ試験を行った結果と、通常のライナープレートの曲げ試験の結果とを比較し、鋼棒を挿入するために設けた開口による曲げ剛性の低下は認められなかったことを確認している。

以上の結果を総合的に判断すると、ライナープレートの単体の曲げ剛性の有効率はおおよそ $\eta_0 = 0.8$ 程度と考えてよさそうである。したがって、今後の解析では $\eta_0 = 0.8$ としてライナープレート単体の曲げ剛性を評価することとした。

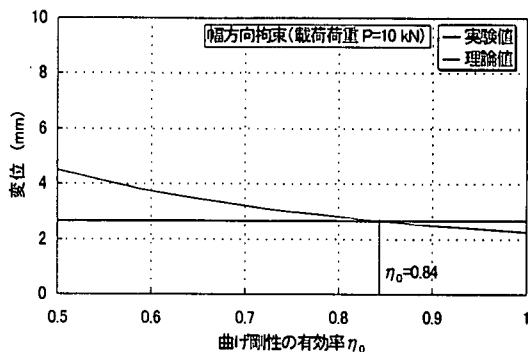


図-4 曲げ剛性の有効率と変位との関係

### 4. ライナープレートの継手曲げ試験

#### 4. 1 試験の概要

本試験はライナープレート間の継手の回転ばね定数を実験的に求めることを目的に行ったものである。

試験には表-2のcase6に示したものと同一、長さ1570mm、幅500mmの直線形状のライナープレートを2枚用い、継手部は4本のM16ボルトで接合した。ライナープレートの諸元は表-1に示したとおりである。図-5に示すようにこれをスパン900mmで単純支持して、載荷幅300mmの2線荷重を鉛直に載荷した。継手部の目開き量は図-6に示すように $\pi$ 型変位計を左右両側のフランジに2ヶ所ずつ設置することにより計測した。なお、ボルトの初期締付け力は、ボルトにひずみゲージを2点貼付して計測した。結果としてボルトひずみは $290\mu$ となり、これを軸力に換算するとボルト一本あたり9.6kNとなった。

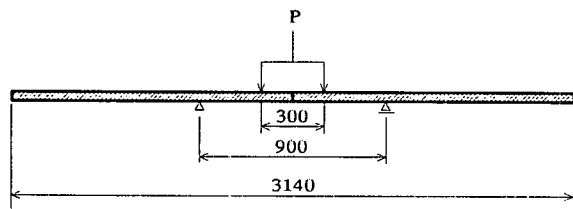


図-5 試験の概要

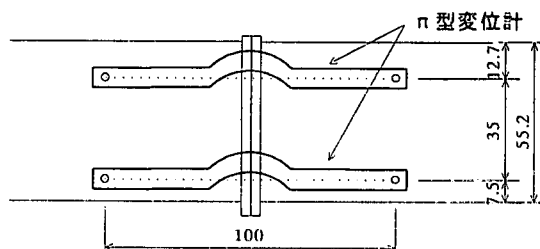


図-6  $\pi$ 型変位形の取付け位置

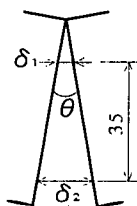


図-7 継手部の変形

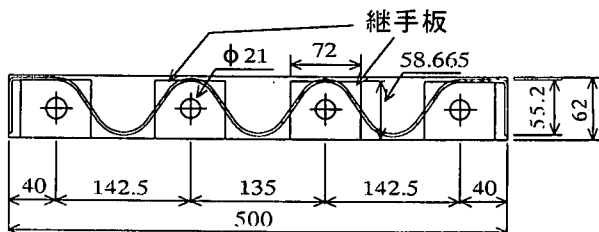


図-8 ライナープレートの継手板

4. 2 試験結果と解析結果との比較

継手部の回転角  $\theta$  は図-6, 7を参照すると次式で表される。

$$\theta = (\delta_2 - \delta_1) / 35$$

図-9は作用曲げモーメント  $M$  とこの式から計算された継手の回転角  $\theta$  との関係を示したものである。図中の点は試験結果をまた実線は解析結果を表している。なお、回転ばね定数を解析的に求める<sup>1)</sup>にあたり、セグメント継手の継手板に相当する部分をライナープレートでは図-8のように仮定した。図-9を見ると、最初の傾きは異なるものの、変形の主たる部分を占める領域の傾きは試験結果と解析結果とでよく一致していることがわかる。したがって、以降の解析に用いる回転ばね定数はこの解析によって得られた値を用いることとした。

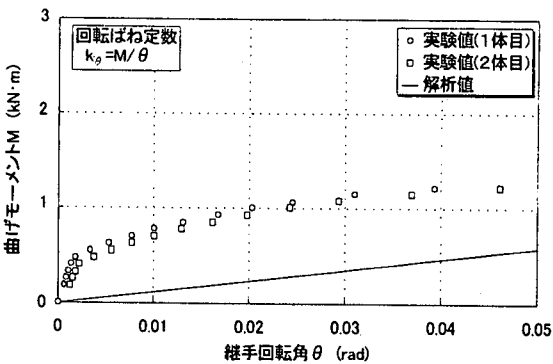


図-9 曲げモーメントと継手回転角との関係

5. ライナープレートのリング载荷試験

5. 1 試験の概要

本試験はライナープレートのリングとしての曲げ剛性を把握することを目的に、ライナープレートをリング状に組み立てて载荷を行ったものである。

試験には半径 1000mm のライナープレートを4リング組み立てて用いた。図-10は試験の概要を示したものである。この4つのリングを上から順にそれぞれB, A, B, Aリングと呼ぶこととする。測定項目はリングに発生するひずみとリングの変位量であり、図-10に示すように下から2番目のBリングにおいて計測している。表-4および図-11は試験のケースを示したものである。ライナープレートの継手に対する载荷方向や千鳥組の状態およびリング間のボルト数を変え、8ケースの試験を行った。

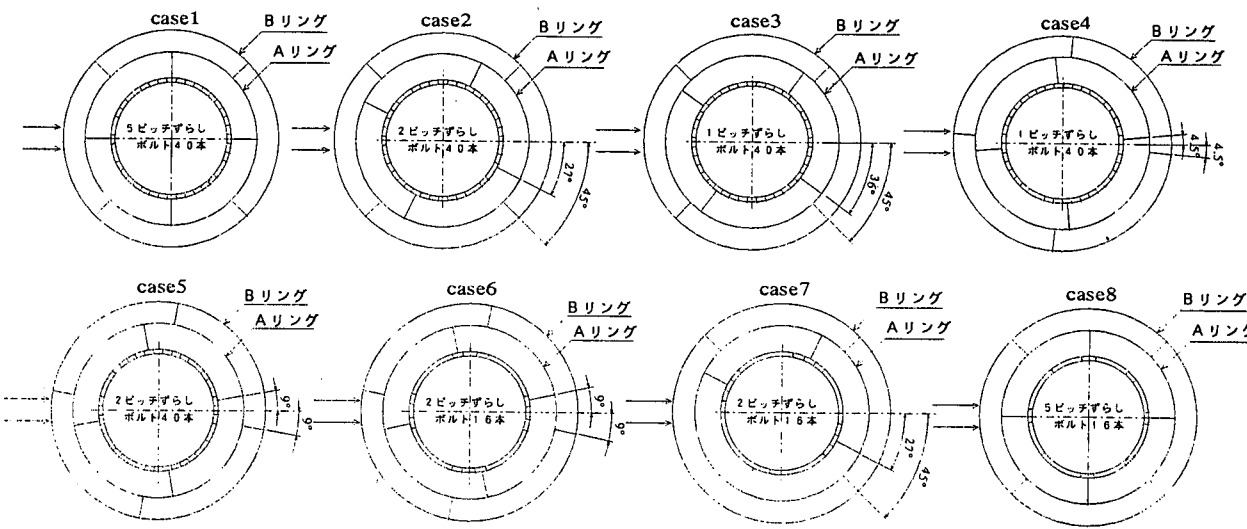


図-11 試験ケース

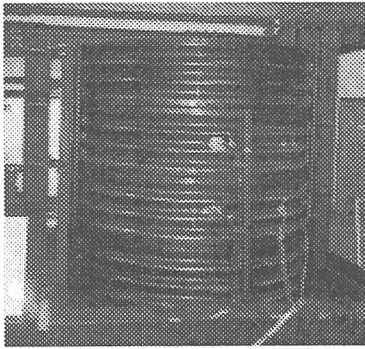


図-10 試験の概要

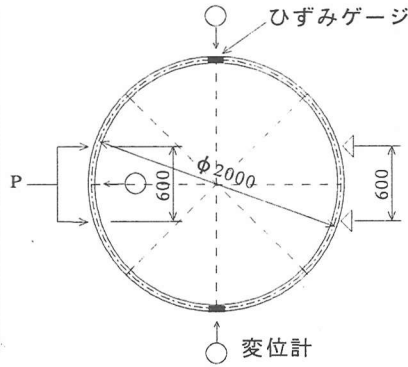


表-4 試験ケース

| 試験ケース | 継手位置のずれ量<br>(ボルト孔のピッチ数) | リング間の<br>ボルト数 |
|-------|-------------------------|---------------|
| case1 | 5ピッチ                    | 40            |
| case2 | 2ピッチ                    | 40            |
| case3 | 1ピッチ                    | 40            |
| case4 | 1ピッチ                    | 40            |
| case5 | 2ピッチ                    | 40            |
| case6 | 2ピッチ                    | 16            |
| case7 | 2ピッチ                    | 16            |
| case8 | 5ピッチ                    | 16            |

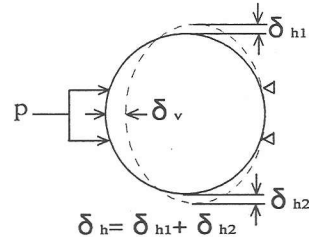


図-12 変形量の定義

## 5. 2 試験結果の整理

試験結果のうち計測されたひずみはそのまま用い、変位は荷重方向の変形量およびそれと直角方向の変形量に換算して整理した。図-12に示すように以下、便宜上前者を鉛直方向変形量 $\delta_v$ 、後者を水平方向変形量 $\delta_h$ と呼ぶことにする。

## 5. 3 はりばねモデル計算法による解析

本試験の解析にははりばねモデル計算法を用いた。単体曲げ試験より得られた知見に基づき、解析に用いた断面二次モーメントは全断面有効の場合(69.73cm<sup>4</sup>)の80%の大きさとし、また継手曲げ試験の結果から回転ばね定数は解析により得られた値を用いることとした。なお、リング間のせん断ばね定数は10MN/mとし、解析値の安定性から境界条件として支点のほかにリングの周辺に微小なばね定数(1.0kN/m<sup>3</sup>)をもつ地盤ばねを配した。解析に用いた諸量を表-5に示す。

## 5. 4 試験結果と解析結果との比較

図-13は荷重とひずみとの関係を、図-14は荷重と変形量との関係を示した一例である。図中の点は試験結果をまた実線および点線は解析結果を表している。

また、図中の $\theta$ は荷重幅の中央を0°として時計回りにとったリングの位置を示している。これらの図より、荷重荷重が約50kNまでの範囲では解析結果は試験結果をよく表現していることがわかる。荷重荷重が約70kNを越えると急激な非線形性を示すが、この非線形性は材料の塑性化によるものではなく、断面変形に起因するもので、断面二次モーメントの急激な減少に伴うものと思われる。実際の現場ではリングの長手方向は連続するリングによって断面変形が拘束される上に背面側の土の抵抗も考えられる。また実験では大きな荷重の範囲まで荷重しているが、実用荷重の範囲は仮設の場合でも50kN程度以下と推定され、はりばねモデル計算法で求めた荷重荷重50kN時の応力度は、仮設の場合の許容応力度を超えていることを確認している。したがって、実用荷重の範囲内でははりばねモデル計算法を用いることによってライナープレートの構造物としての挙動を精度よく説明することができそうである。

表-5 解析に用いた諸量

| ライナープレートの物性値                |                             |      |
|-----------------------------|-----------------------------|------|
| ヤング率(kN/mm <sup>2</sup> )   | 210                         |      |
| 幅(mm)                       | 500                         |      |
| 断面積(cm <sup>2</sup> )       | 19.66                       |      |
| 断面二次モーメント(cm <sup>4</sup> ) | 55.784(η <sub>0</sub> =0.8) |      |
| プレートの継手(セグメント継手に相当)の物性値     |                             |      |
| 回転ばね                        | 離間前                         | 離間後  |
| 正曲げ(kN・m/rad)               | 11.7                        | 11.6 |
| 離間モーメント(kN・m)               | 1.23                        |      |
| 負曲げ(kN・m/rad)               | 14.7                        | 14.7 |
| 離間モーメント(kN・m)               | 1.25                        |      |
| リング継手の物性値                   |                             |      |
| 接線方向(MN/m)                  | 10                          |      |
| 法線方向(MN/m)                  | 10                          |      |
| 地盤ばねの物性値                    |                             |      |
|                             | 圧縮                          | 引張   |
| 接線方向(kN/m <sup>3</sup> )    | 1.0                         | 1.0  |
| 法線方向(kN/m <sup>3</sup> )    | 1.0                         | 1.0  |

解析にはシールドトンネルの汎用解析プログラム  
moleman(ver.2.0)を使用

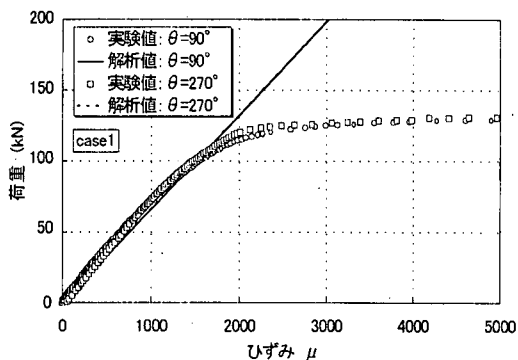


図-1 3 荷重とひずみとの関係(case1)

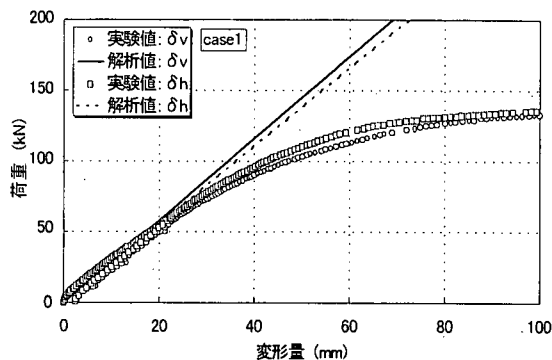


図-1 4 荷重と変形量との関係(case1)

### 5. 5 リングとしての曲げ剛性の有効率の検討

次にライナープレートにより形成されたリングを剛性が一樣なリングとして評価した場合の変形量について検討を行った。まずリング全体の曲げ剛性の有効率を $\eta$ とし、 $\eta$ を1から0.1まで0.1きざみで変化させて、試験結果の変形量と等しくなる $\eta_v$ 、 $\eta_h$ を逆算した。リング全体の $\eta$ はこれらの平均値(次式)により定めた。

$$\eta = \frac{\eta_v + \eta_h}{2}$$

ここに、

$\eta_v$ :鉛直方向変形量 $\delta_v$ から求めた曲げ剛性の有効率

$\eta_h$ :水平方向変形量 $\delta_h$ から求めた曲げ剛性の有効率である。なお、変形量の試験結果は最小自乗法により載荷荷重を10kNに換算している。

図-1 5は例として case1 の場合の曲げ剛性の有効率と変形量との関係を示したものであり、表-6は各試験ケースにおいて得られた $\eta$ の値をまとめたものである。表-6より以下のことがわかる。

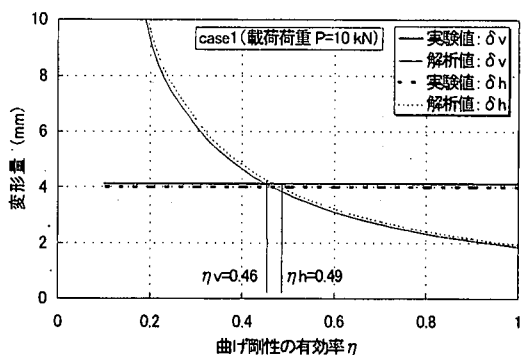


図-1 5 曲げ剛性の有効率と変形量との関係(case1)

表-6 各試験ケースでの $\eta$ の値

| 試験ケース | $\eta_v$ | $\eta_h$ | $\eta=(\eta_v+\eta_h)/2$ |
|-------|----------|----------|--------------------------|
| case1 | 0.46     | 0.49     | 0.47                     |
| case2 | 0.67     | 0.70     | 0.69                     |
| case3 | 0.78     | 0.88     | 0.83                     |
| case4 | 0.28     | 0.35     | 0.32                     |
| case5 | 0.33     | 0.40     | 0.36                     |
| case6 | 0.35     | 0.43     | 0.39                     |
| case7 | 0.65     | 0.68     | 0.67                     |
| case8 | 0.48     | 0.55     | 0.52                     |

①case1 と case8, case2 と case7 および case5 と case6をそれぞれ比較すると、リング間のボルト数の違いによる曲げ剛性の低下はさほど見られない。

②case1, case2 および case3を比較すると、載荷点が継手部から離れている場合は、千鳥組による継手位置のずれ量が小さいほど曲げ剛性の低下は小さい。

③case4 と case5とを比較すると、②で述べたこととは反対に、載荷点が継手部に近い場合は千鳥組による継手位置のずれ量が小さいほど曲げ剛性の低下は大きい。

④載荷点が継手部に近いcase4, case5 および case6では他のケースと比べて曲げ剛性の低下が大きい。

現実の施工ではリング間のボルト数の低減は行なわず、また千鳥組による継手位置のずれ量はリング継手のボルト孔で5ピッチ(case1)から2ピッチ(case2,case5)としている。しかしながら以上の結果をみると、地盤条件や施工条件に応じてそれらを変化させるなど検討の余地がありそうに思われる。

## 6. まとめ

本研究における各種の試験とその解析から以下のようなことが明らかになった。

- ①ライナープレート単体の曲げ剛性の有効率は概ね 80% と評価してよい。なお、曲げ剛性の有効率は変形や不静定力を算出するのに用いられるべきものであり、応力度の照査にあたっては全断面有効として取り扱うのが一般的である。
- ②ライナープレート単体の曲げ剛性の有効率を 80%、リング間のせん断ばね定数を 10MN/m 程度とし、継手の回転ばね定数を解析的に求めることによって、はり-ばねモデル計算法を用いてライナープレートを用いた構造物の挙動を説明することができる。
- ③現実の施工ではリング間のボルトはすべて締結しているが、地盤条件や施工条件に応じてボルト本数を減らすことも可能である。また千鳥組による継手位置のずれ量も、現状では 5 ピッチから 2 ピッチとしているが、これも条件に応じて変化させることができそうである。

得られたリング全体の曲げ剛性の有効率  $\eta$  の値はかなり小さめのものであるが、これは明るみにおける実験値であり、地盤中における値は 8~9 割程度になるものと予想される。シールドトンネルの場合の曲げ剛性の有効率は地上で実験を行えば鋼製セグメントで 5 割程度、コンクリートセグメントで 6 割程度である。しかし地中においては地盤がトンネルの変形を拘束するため、千鳥組にすれば一般に 9 割以上は確保される<sup>2)</sup>。このようなことからシールドトンネルではそのほとんどが剛性一様リングとして設計されているのが実情である。このためライナープレートで構成されるリングも正確にははり-ばねモデル計算法を用いて検討する必要があると思われるが、簡易な設計を行うにあたっては、ライナープレートと地山との間の裏込めを十分に行なえば剛性一様リングとして計算してもよさそうである。

現在、ライナープレートの設計は全断面有効かつ曲げ剛性一様部材、すなわち  $\eta_0=1$ 、 $\eta=1$  として行なっている。しかしながら、十分な地盤の抵抗土圧が考えられる場合や座屈現象など曲げ剛性が設計結果に大きな影響を与える場合などでは、曲げ剛性の有効率を低減して設計するか、はり-ばねモデル計算法を用いて詳細な設計を行う方が望ましいと考えられる。

コルゲート・ライナー技術協会ではこの結果をふまえて、現在その設計・施工マニュアルの作成作業を進めている。今後はさらに大断面や異形断面を想定し数値実験やライナープレートと補強リング(H形鋼)との合成效果および半径と曲げ剛性の有効率との関係を明確にするなどの検討を加えていく必要がある。

本論文はコルゲート・ライナー技術協会が進めている設計・施工マニュアルの作成作業の過程で得られた研究成果の一部である。本研究を進めるにあたりコルゲート・ライナー技術協会およびその会員各社(川鉄建材㈱、住友金属建材㈱、日鐵建材工業㈱、日本鋼管ライトスチール㈱)の担当者の皆様には実験データの提供ならびに多大なご協力をいただいた。ここに記して感謝の意を表する次第である。

## 参考文献

- 1) 村上博智, 小泉淳: シールド工用セグメントのセグメント継手の挙動について, 土木学会論文報告集, 第 296 号, 1980
- 2) 村上博智, 小泉淳: シールドセグメントリングの耐荷機構について, 土木学会論文報告集, 第 272 号, 1978