

シールド セグメントの応力に対する継手剛性の影響

EFFECT OF JOINT RIGIDITY ON THE STRESSES IN LININGS FOR SHIELD TUNNELLING

久保慶三郎*・結城皓暉**
By Keizaburo Kubo and Teruhiro Yuki

要旨 シールド セグメントの継手の剛性がセグメント本体部に比して小さい場合、このセグメントを千鳥に組んだトンネルに土圧が作用すると、リングどうしの継手のボルトにはせん断力が生じ、セグメント リングの応力、たわみは継手のない一様なリングよりも大きくなる。

ここでは、継手剛性の低下によるセグメント リングの応力、たわみの増加を理論的に求め、実験により理論の妥当性を検証した。

1. はじめに

シールド工法におけるトンネルは、セグメントどうしをボルトで結合（「セグメント継手」と呼ぶ）してリングを組み上げ、このリングを「軸方向ボルト」で連結してトンネルを形成しているが、一般に「セグメント継手」の剛性、強度はセグメント本体部に比して劣っている場合が多く、そのためこの部分の弱点をカバーし、リングの変形を少なくするために、リングどうしは「セグメント継手」がトンネル軸方向に通らないように千鳥に連結されている。このために、トンネルに外圧が作用すると、「軸方向ボルト」により相隣るリングが互いに変形を拘束されるため、このボルトにはせん断力が作用する。このせん断力を $Q/2$ とすると、リングには結局 Q なる力が「軸方向ボルト」位置に作用することになり、このためリングの応力は継手のないリング（一様リングと呼ぶ）よりも大きくなり、また異なった分布になると考えられる。

現在のところ、セグメント リングの断面の設計は、継手のないリングという仮定で行なわれており、したがって、実際には一様リングの場合に比して大きい応力が作用している可能性がある。

ここでは、2種類の形式（6個の継手と4個の継手を持つ場合）のセグメント リングについて、2軸対称な外圧が作用し、かつ周囲には土などの支持がない場合を最小仕事の原理によって解析し、「軸方向ボルト」に作用するせん断力、セグメント リングの応力、たわみと継

手剛性との関係を求め、一様 リングとの比較を行なった。さらに、実験によって理論の妥当性を検証した。

2. 解析の方法

解析にあたりつぎのような仮定を行なう。

(1) セグメント リングは 図-1 のように「セグメント継手」を曲げモーメントに対してばねとして扱い、継手剛性をばね定数で表わす。軸力、せん断力による継手の変形はないものとする。

(2) 「軸方向ボルト」の径に対して、ボルト穴のクリアランスは小さく、したがって相隣るリングは「軸方向ボルト」位置で互いの変位は等しく、せん断力によるずれは生じないものとする。

(3) リングの変形が2軸対称の場合、円周方向の成分は半径方向の成分に比して小さいのでこれを無視する。

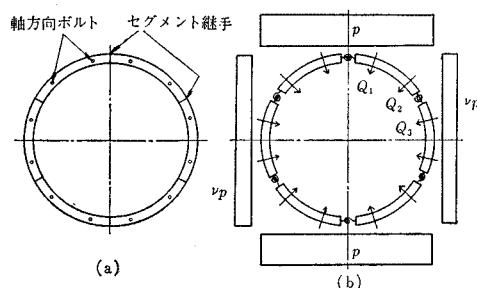
(4) 「セグメント継手」の曲げモーメントによる折れ曲がりは微小変形とする。

(5) セグメント本体部の曲げ剛性は一定とし、セグメントの厚さはリングの半径に比して十分小さいものとする。

(6) リングに作用する外圧は鉛直方向、水平方向ともに長方形分布荷重とし、鉛直方向荷重に対する水平方向荷重の比は $\nu (< 1.0)$ とする。

以上の仮定にもとづいて、図-1 (b) のようにリングを模型化し、外圧および「軸方向ボルト」位置に未知力 Q が作用したときの「軸方向ボルト」位置の変位式を求める。つぎに、相隣るリングでは互いに Q は大きさが

図-1 セグメントの模型化



* 正会員 工博 東京大学教授 生産技術研究所
** 正会員 石川島播磨重工 KK 技術研究所構造研究室

等しく、向きが逆に作用していること、および「軸方向ボルト」位置の変位が等しい条件より未知力 Q が求められる。

セグメントリングは円周を6等分割した6個のセグメントよりなるもの、および4等分割した4個のセグメントよりなるものの2種類のリングについて解析を行なう。

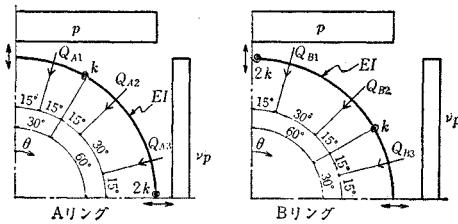
3. 解析

円周を6等分割した6個のセグメントより成るリングで「軸方向ボルト」は各セグメントに2箇所あり、これを「セグメント継手」がトンネル軸方向に通らないよう千鳥に組まれた場合について解析する。

セグメントリングの半径を R 、セグメント本体部の曲げ剛性を EI 、継手のばね定数を k として、頂部に継手がないリングをAリング、頂部にあるものをBリングと呼ぶことにする。

外圧として、鉛直方向荷重 p 、水平方向荷重 νp なる二軸対称分布荷重を考えると、対称性より図-2のようにリングの1/4だけとり出して考えることができる。

図-2



いま、「軸方向ボルト」位置に作用する力 Q を既知とすると、リングの軸力、せん断力はつりあい式のみから決定でき、A、Bリングは一次不静定となる。

まず、Aリングについて考えて、 $\theta=0$ における曲げモーメント $M_A(0)$ をつぎのようにおく

$$M_A(0)=\bar{M}_A(0)+X_A \quad \dots \dots \dots (1)$$

ただし、

$\bar{M}_A(\theta)$:一様リングの θ における曲げモーメント
 X_A :不静定モーメント

そうすると、 θ における曲げモーメント $M_A(\theta)$ は

$$M_A(\theta)=\bar{M}_A(\theta)+X_A \quad \dots \dots \dots (2)$$

となる。ここで $\bar{M}_A(\theta)$ は次式で表わされる。

$$\bar{M}_A(\theta)=D(\theta)pR^2+RS(\theta)Q_A \quad \dots \dots \dots (3)$$

$$D(\theta)^{(1)}=\frac{1}{4}(1-\nu)\cos 2\theta$$

$$S(\theta)^{(2)}=[S_1(\theta) \quad S_2(\theta) \quad S_3(\theta)]$$

$$S_1(\theta)=\frac{2}{\pi}-\frac{1}{2}\left|\sin\left(\theta+\frac{\pi}{12}\right)\right|-\frac{1}{2}\left|\sin\left(\theta-\frac{\pi}{12}\right)\right|$$

$$S_2(\theta)=\frac{2}{\pi}-\frac{1}{2}\left|\sin\left(\theta+\frac{\pi}{4}\right)\right|-\frac{1}{2}\left|\sin\left(\theta-\frac{\pi}{4}\right)\right|$$

$$S_3(\theta)=\frac{2}{\pi}-\frac{1}{2}\left|\sin\left(\theta+\frac{5\pi}{12}\right)\right|-\frac{1}{2}\left|\sin\left(\theta-\frac{5\pi}{12}\right)\right|$$

$$\mathbf{Q}_A=\begin{bmatrix} Q_{A1} \\ Q_{A2} \\ Q_{A3} \end{bmatrix}$$

$$\dots \dots \dots (4)$$

対称性より、 $\theta=0, \pi/2$ の二つの点の相対回転角は0とならなければならないから

$$\int_0^{\pi/2} \frac{\bar{M}_A(\theta)}{EI} Rd\theta + \frac{M_A(\pi/6)}{k} + \frac{M_A(\pi/2)}{2k} = 0$$

式(2)を用いると上式は

$$\int_0^{\pi/2} \frac{\bar{M}_A(\theta)}{EI} Rd\theta + \int_0^{\pi/2} \frac{X_A}{EI} Rd\theta + \frac{\bar{M}_A(\pi/6)+X_A}{k} + \frac{\bar{M}_A(\pi/2)+X_A}{2k} = 0 \dots \dots \dots (5)$$

となる。ここで

$$\int_0^{\pi/2} \frac{\bar{M}_A(\theta)}{EI} Rd\theta = 0$$

であるから、式(5)は

$$\frac{\pi R}{2EI} X_A + \frac{\bar{M}_A(\pi/6)+X_A}{k} + \frac{\bar{M}_A(\pi/2)+X_A}{2k} = 0$$

これより、不静定モーメント X_A はつぎのようになる。

$$X_A = K \left\{ \bar{M}_A(\pi/6) + \frac{1}{2} \bar{M}_A(\pi/2) \right\} \\ = KR(H_A pR + C_A Q_A) \dots \dots \dots (6)$$

ここで、

$$K = -\frac{1}{\lambda + 3/2}$$

$$\lambda = \frac{\pi R k}{2 E I} \quad (\text{継手剛比})$$

$$H_A = D\left(\frac{\pi}{6}\right) + \frac{1}{2} D\left(\frac{\pi}{2}\right)$$

$$C_A = S\left(\frac{\pi}{6}\right) + \frac{1}{2} S\left(\frac{\pi}{2}\right)$$

つぎに、「軸方向ボルト」位置(Q の作用点)の変位を求める。 Q_{AN} ($N=1, 2, 3$)の作用点の変位を d_{AN} とすると、最小仕事の原理により

$$d_{AN} = \int_0^{\pi/2} \frac{\bar{M}_A(\theta)}{EI} \cdot \frac{\partial M_A(\theta)}{\partial Q_{AN}} Rd\theta \\ + \frac{1}{k} M(\pi/6) \frac{\partial M_A(\pi/6)}{\partial Q_{AN}} + \frac{1}{2k} M_A(\pi/2) \frac{\partial M_A(\pi/2)}{\partial Q_{AN}} \\ = \frac{1}{EI} \int_0^{\pi/2} (\bar{M}_A(\theta) + X_A) \left(\frac{\partial \bar{M}_A(\theta)}{\partial Q_{AN}} + \frac{\partial X_A}{\partial Q_{AN}} \right) Rd\theta \\ + \frac{1}{k} (\bar{M}_A(\pi/6) + X_A) \left(\frac{\partial \bar{M}_A(\pi/6)}{\partial Q_{AN}} + \frac{\partial X_A}{\partial Q_{AN}} \right) \\ + \frac{1}{2k} (\bar{M}_A(\pi/2) + X_A) \left(\frac{\partial \bar{M}_A(\pi/2)}{\partial Q_{AN}} + \frac{\partial X_A}{\partial Q_{AN}} \right) \dots \dots \dots (7)$$

ここで、

$$\int_0^{\pi/2} \bar{M}_A(\theta) \frac{\partial X_A}{\partial Q_{AN}} Rd\theta = \frac{\partial X_A}{\partial Q_{AN}} \int \bar{M}_A(\theta) Rd\theta = 0 \\ \int_0^{\pi/2} X_A \frac{\partial \bar{M}_A(\theta)}{\partial Q_{AN}} Rd\theta = X_A \int \frac{\partial \bar{M}_A(\theta)}{\partial Q_{AN}} Rd\theta = 0 \dots \dots \dots (8)$$

である。また式(3), 式(5)より

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \bar{M}_A(\theta)}{\partial Q_{AN}} &= RS_N(\theta) \\ \frac{\partial X_A}{\partial Q_{AN}} &= KRC_{AN} = KR \left\{ S_N(\pi/6) + \frac{1}{2} S_N(\pi/2) \right\} \end{aligned} \right\}$$

..... (9) ↗

式(8), (9)を用い, また

$$\begin{aligned} & \int_0^{\pi/2} \bar{M}_A(\theta) \frac{\partial \bar{M}_A(\theta)}{\partial Q_{AN}} R d\theta \\ &= R^3 \int_0^{\pi/2} \{D(\theta)pR + S(\theta)Q_A\} S_N(\theta) d\theta \\ &= R^3 (T_N p R + F_N Q_A) \quad \dots \dots \dots (10) \end{aligned}$$

とおいて式(7)を書き改めると、

$$\begin{aligned}
d_{AN} &= \frac{R^3}{EI} (T_N p R + \mathbf{F}_N \mathbf{Q}_A) + \frac{\pi}{2} \frac{R^3}{EI} K (H_A p R + \mathbf{C}_A \mathbf{Q}_A) K C_{AN} \\
&\quad + \frac{1}{k} R^2 (D(\pi/6) p R + \mathbf{S}(\pi/6) \mathbf{Q}_A + K H_A p R + K \mathbf{C}_A \mathbf{Q}_A) (S_N(\pi/6) + K C_{AN}) \\
&\quad + \frac{1}{2k} R^2 (D(\pi/2) p R + \mathbf{S}(\pi/2) \mathbf{Q}_A + K H_A p R + K \mathbf{C}_A \mathbf{Q}_A) (S_N(\pi/2) + K C_{AN}) \\
&= \frac{R^3}{EI} \left[T_N p R + \mathbf{F}_N \mathbf{Q}_A + \frac{\pi}{2} K (H_A p R + \mathbf{C}_A \mathbf{Q}_A) K C_{AN} \right. \\
&\quad + \frac{\pi}{2} \frac{1}{\lambda} \{ (D(\pi/6) + K H_A) p R + (\mathbf{S}(\pi/6) + K \mathbf{C}_A) \mathbf{Q}_A \} (S_N(\pi/6) + K C_{AN}) \\
&\quad \left. + \frac{\pi}{4} \frac{1}{\lambda} \{ (D(\pi/2) + K H_A) p R + (\mathbf{S}(\pi/2) + K \mathbf{C}_{AN}) \mathbf{Q}_A \} (S_N(\pi/2) + K C_{AN}) \right] \\
&= \frac{R^3}{EI} \left[T_N + \frac{\pi}{2} K^2 H_A C_{AN} + \frac{\pi}{2} \frac{1}{\lambda} (D(\pi/6) + K H_A) (S_N(\pi/6) + K C_{AN}) \right. \\
&\quad + \frac{\pi}{4} \frac{1}{\lambda} (D(\pi/2) + K H_A) (S_N(\pi/2) + K C_{AN}) \left. \right] p R \\
&\quad + \frac{R^3}{EI} \left[\mathbf{F}_N + \frac{\pi}{2} K^2 \mathbf{C}_A C_{AN} + \frac{\pi}{2} \frac{1}{\lambda} (\mathbf{S}(\pi/6) + K \mathbf{C}_A) (S_N(\pi/6) + K C_{AN}) \right. \\
&\quad \left. + \frac{\pi}{4} \frac{1}{\lambda} (\mathbf{S}(\pi/2) + K \mathbf{C}_A) (S_N(\pi/2) + K C_{AN}) \right] \mathbf{Q}_A \quad \dots \dots \dots \quad (11)
\end{aligned}$$

ここで、 T_N , F_N はそれぞれ一様リングの土圧、 \mathbf{Q} による Q_N 作用点の変位をあらわしており、つぎのようになる。

$$X_B = K \left\{ \frac{1}{2} \bar{M}_B(0) + M_B(\pi/3) \right\} \\ = KR(H_B p R + C_B Q_B) \quad \dots \dots \dots (6)'$$

$$\left. \begin{array}{l} T_1 = t \cos(\pi/6) \\ T_2 = t \cos(\pi/2) \\ T_3 = t \cos(5\pi/6) \end{array} \right\} \dots \quad (12)$$

ただし,

$$t = \frac{(1-\nu)pR^4}{12EI}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{F}^T_1 &= \begin{bmatrix} f(0) + f(\pi/6) \\ f(\pi/6) + f(\pi/3) \\ f(\pi/3) + f(\pi/2) \end{bmatrix} \\ \mathbf{F}^T_2 &= \begin{bmatrix} f(\pi/6) + f(\pi/3) \\ f(0) + f(\pi/2) \\ f(\pi/6) + f(\pi/3) \end{bmatrix} \\ \mathbf{F}^T_3 &= \begin{bmatrix} f(\pi/3) + f(\pi/2) \\ f(\pi/6) + f(\pi/3) \\ f(0) + f(\pi/6) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (13)$$

ただし、

$$f(\theta) = -\frac{1}{\pi} + \frac{1}{4} \left(\frac{\pi}{2} - \theta \right) \cos \theta + \frac{1}{4} \sin(\theta)$$

Bリングについても同様にして

$$Q_B = \begin{bmatrix} Q_{B_1} \\ Q_{B_2} \\ Q_{B_3} \end{bmatrix} \dots \dots \dots \quad (4)'$$

ここで、

$$C_B = \frac{1}{2} S(0) + S(\pi/3)$$

Q_{BN} の作用点の変位を d_{BN} とおいて

$$\begin{aligned}
d_{BN} = & \frac{R^3}{EI} \left[T_N + \frac{\pi}{2} K^2 H_B C_{BN} \right. \\
& + \frac{\pi}{4} \frac{1}{\lambda} (D(0) + KH_B) (S_N(0) + KC_{BN}) \\
& + \frac{\pi}{2} \frac{1}{\lambda} (D(\pi/3) + KH_B) (S_N(\pi/3) + KC_{BN}) \Big] p R \\
& + \frac{R^3}{EI} \left[F_N + \frac{\pi}{2} K^2 C_B C_{BN} \right. \\
& + \frac{\pi}{2} \frac{1}{\lambda} (S(0) + KC_B) (S_N(0) + KC_{BN}) \\
& \left. + \frac{\pi}{2} \frac{1}{\lambda} (S(\pi/3) + KC_B) (S_N(\pi/3) + KC_{BN}) \right] Q_B
\end{aligned}$$

(11)'

が得られる。

AリングとBリングは「軸方向ボルト」で結合されているから、この点で互いに変位は等しい。また「軸方向ボルト」に作用する力はそれぞれのリングで大きさが等しく、方向が逆に作用していることから、式(11), (11)^aにおいて

$$\begin{aligned}
 d_{AN} &= d_{BN} \\
 Q_A &= -Q_B = Q \\
 \text{ただし, } & \\
 \left[2F_N + \frac{\pi}{2}K^2(C_{AN}C_A + D_{BN}C_B) + \frac{\pi}{4}\frac{1}{\lambda}(S_N(0) + KC_{BN})(S(0) + KC_B) \right. \\
 &+ \frac{\pi}{2}\frac{1}{\lambda}(S_N(\pi/6) + KC_{AN})(S(\pi/6) + KC_A) + \frac{\pi}{2}\frac{1}{\lambda}(S_N(\pi/3) + KC_{BN})(S(\pi/3) + KC_B) \\
 &+ \frac{\pi}{4}\frac{1}{\lambda}(S_N(\pi/2) + KC_{AN})(S(\pi/2) + KC_A) \left. \right] Q + \left[\frac{\pi}{2}K^2(H_{AN}C_{AN} - H_{BN}C_{BN}) \right. \\
 &- \frac{\pi}{4}\frac{1}{\lambda}(S_N(0) + KC_{BN})(D(0) + KH_B) + \frac{\pi}{2}\frac{1}{\lambda}(S_N(\pi/6) + KC_{AN})(D(\pi/6) + KH_A) \\
 &- \frac{\pi}{2}\frac{1}{\lambda}(S_N(\pi/3) + KC_{BN})(D(\pi/3) + KH_B) + \frac{\pi}{4}\frac{1}{\lambda}(S_N(\pi/2) + KC_{AN})(D(\pi/2) + KH_A) \left. \right] pR = 0 \cdots (15)
 \end{aligned}$$

式(15)は $N=1,2,3$ の三元連立方程式となり、これを解けば $Q(Q_1, Q_2, Q_3)$ が定まる。

この Q の値を用いれば、リングの応力、たわみを求めることができる。

以上は 6 セグメント リングについて解析したが、他種のリングについても同様の方法で解析できる。

4. 計算結果

「セグメント継手」の継手剛比 λ の種々の値に対して Q を計算し、その結果を図-3 に示す。ただし、「軸方向ボルト」に作用するせん断力は $Q/2$ である。

なお、 $\lambda=\infty$ のときは、継手のない一様リングと一致する。

継手剛比の低下によって付加される応力、すなわち、一様リングとの差は図-4、図-5、図-6 のようになり、それぞれ付加曲げモーメント、付加軸力、付加せん断力を示している。また、リングの上下方向のたわみ(A リングの鉛直方向の直径の減少量)は図-7 のようになる。

ここでとりあげた 6 セグメント リングは継手剛比 λ が 0 になると不安定となり、解は存在しないので λ の値は 0.0001 まで計算を行なった。

この結果、 λ の値が減少するにしたがって、 Q の値および付加たわみは増大し、 λ が 8.0~9.0 以下になると急激に増大することがわかる。またリングの応力についても同様の傾向があり、 λ が 0 に近づくと曲げモーメントの最大値は一様リングのほぼ 2 倍になっている。

4 セグメント リングについても同様の計算を行ない、その結果を図-8~図-12 に示す。この場合は $\lambda=0$ のとき B リングは不安定となるが、A リングはここで考えている土圧分布に関するかぎり安定であるため解は存在する。

計算結果は 6 セグメント リングの場合と同

$$Q = \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \end{bmatrix} \quad \rightarrow \quad \text{とおくと}$$

$$\begin{aligned}
 &\left[2F_N + \frac{\pi}{2}K^2(C_{AN}C_A + D_{BN}C_B) + \frac{\pi}{4}\frac{1}{\lambda}(S_N(0) + KC_{BN})(S(0) + KC_B) \right. \\
 &+ \frac{\pi}{2}\frac{1}{\lambda}(S_N(\pi/6) + KC_{AN})(S(\pi/6) + KC_A) + \frac{\pi}{2}\frac{1}{\lambda}(S_N(\pi/3) + KC_{BN})(S(\pi/3) + KC_B) \\
 &+ \frac{\pi}{4}\frac{1}{\lambda}(S_N(\pi/2) + KC_{AN})(S(\pi/2) + KC_A) \left. \right] Q + \left[\frac{\pi}{2}K^2(H_{AN}C_{AN} - H_{BN}C_{BN}) \right. \\
 &- \frac{\pi}{4}\frac{1}{\lambda}(S_N(0) + KC_{BN})(D(0) + KH_B) + \frac{\pi}{2}\frac{1}{\lambda}(S_N(\pi/6) + KC_{AN})(D(\pi/6) + KH_A) \\
 &- \frac{\pi}{2}\frac{1}{\lambda}(S_N(\pi/3) + KC_{BN})(D(\pi/3) + KH_B) + \frac{\pi}{4}\frac{1}{\lambda}(S_N(\pi/2) + KC_{AN})(D(\pi/2) + KH_A) \left. \right] pR = 0 \cdots (15)
 \end{aligned}$$

図-3 Q の値(6 セグメント リング)

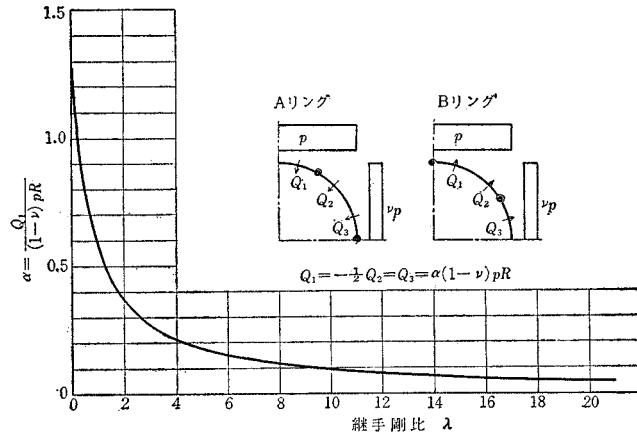


図-4 付加曲げモーメント(6 セグメント リング)

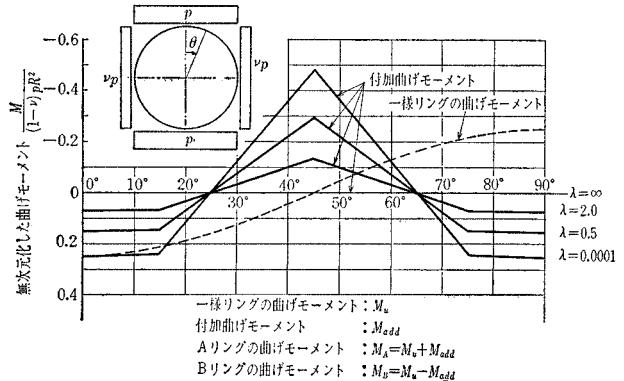


図-5 付加軸力(6 セグメント リング)

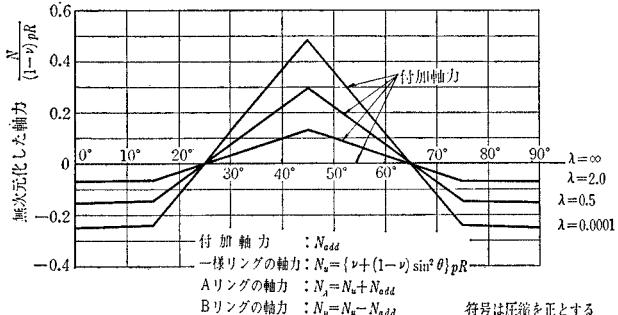


図-6 付加せん断力(6セグメントリング)

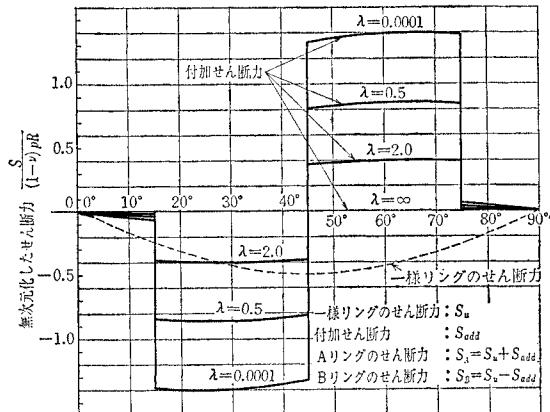


図-7 付加たわみ(6セグメントリング)

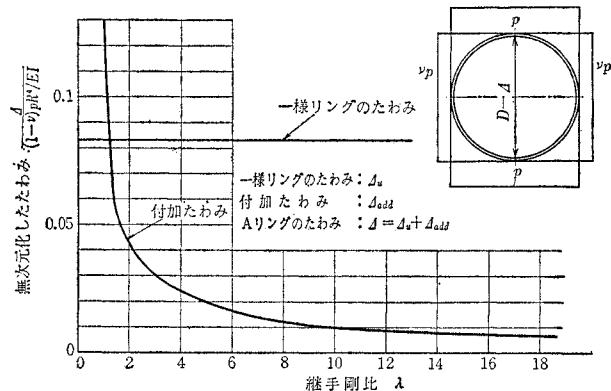


図-8 Qの値(4セグメントリング)

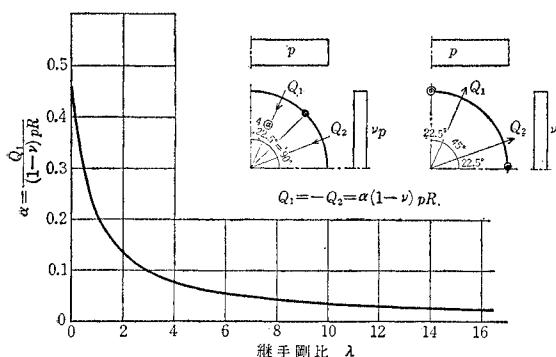


図-9 付加曲げモーメント(4セグメントリング)

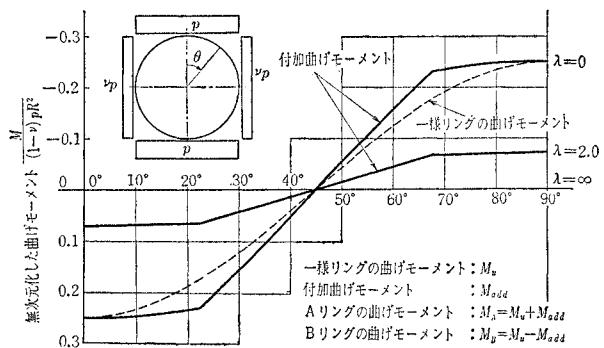


図-10 付加軸力(4セグメントリング)

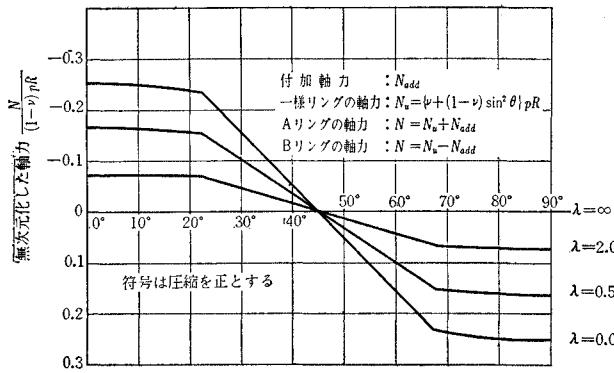


図-11 付加せん断力(4セグメントリング)

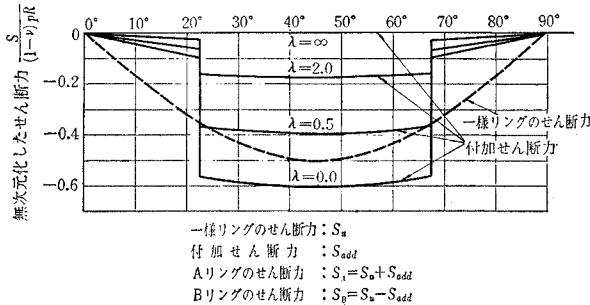
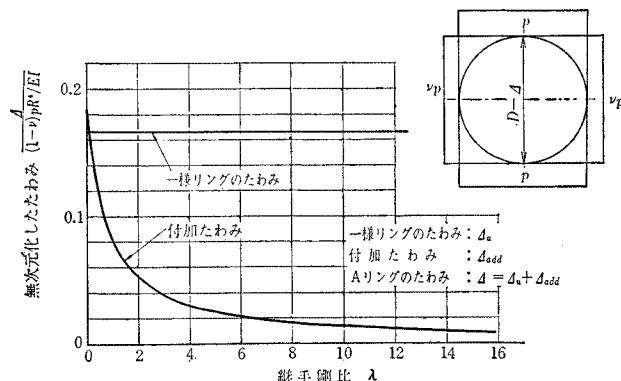


図-12 付加たわみ(4セグメントリング)



様に、 λ の減少にしたがって Q 、付加たわみとともに増大し、 λ が 8.0~9.0 以下では急激に増大する。また $\lambda = 0$ のとき、最大曲げモーメントは一様リングの 2 倍となる。

6セグメントリングと4セグメントリングを比較すると、 Q の値および最大せん断力は前者が後者の約 2 倍になっている。たわみおよび最大曲げモーメントは両者の間の差は小さい。

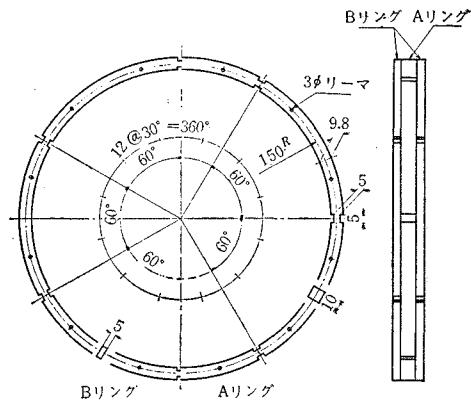
5. 実験

解析に用いた理論の妥当性を検証するためにリング模型を製作して載荷試験を行なった。

(1) 試験体

試験体は 6セグメントより成るリングとして 図-13

図-13 試験体



に示す A リングと B リングを製作し、「セグメント継手」に相当するものとして、その位置に切欠きを設けて継手の剛性を低下させた。

A リングと B リングは「セグメント継手」が重ならないように、A リングをはさんで両側から B リングを重ね、リーマボルトで連結した。

試験体の要目はつぎのようである。

材質: SS

半径: 150 mm

幅: 10 mm (A リング), 5 mm (B リング)

厚さ: 9.8 mm (9.7~9.9 の範囲にあり平均 9.8 mm)

切欠部の長さ: 5 mm

切欠部の厚さ: 5 mm

(2) 試験方法

荷重として、土圧による分布荷重の代わりに試験体の上下端から 15° の「軸方向ボルト」位置におけるリング中心に向かう集中荷重を採用し、図-14 に示すような 4 点集中荷重によって実験を行なった。

図-14 載荷方法

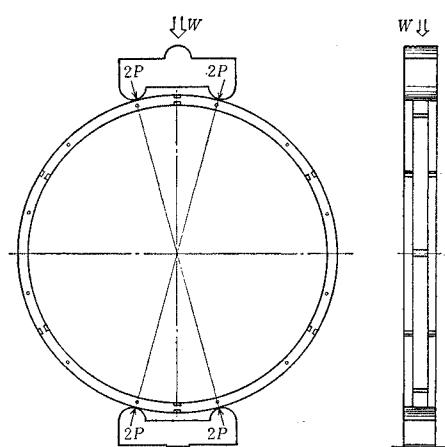
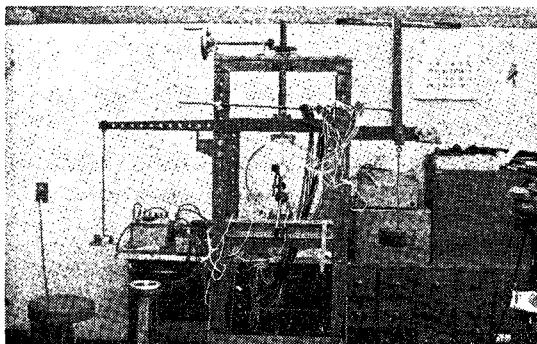


写真-1 試験装置



試験装置は写真-1のようにテコを利用しておもりで載荷するようになっており

w : おもりの重量

とすれば

$$W = 4w$$

となり、A, B 各リングには

$$P = \frac{1}{4} W \sec 15^\circ$$

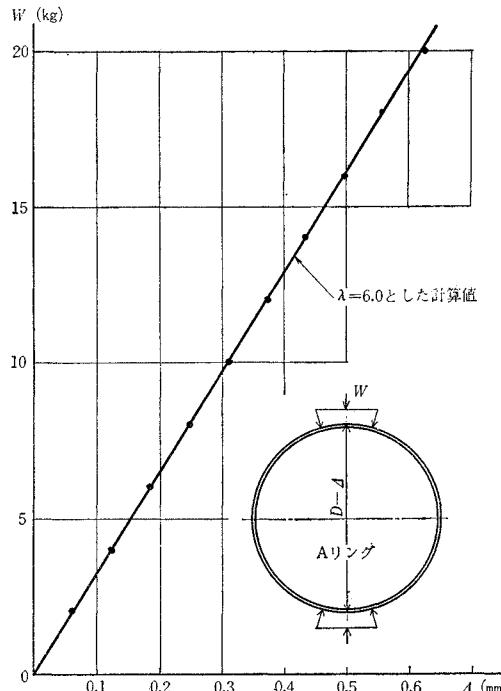
なる集中荷重が作用することになる。

荷重によって試験体リングが変形すると A および B リングは互いに拘束し合い、リングの応力、たわみはその影響を受けることになる。

たわみの測定は B リングの上下端の変位を 1/1 000 mm ダイアルゲージを用いて測定して直径の変化量を求めた。

リングのひずみは抵抗線ひずみ計(ゲージ長さ 3 mm)

図-15 A リングのたわみ実験結果



を頂点から 15° おきに 90° まで貼付して計測した。ただし荷重点と切欠部では $15^\circ/4$ だけずらした。

なお、弾性範囲内で試験をするために切欠部が降伏しないよう最大ひずみが 250×10^{-6} を超えない範囲で載荷した。

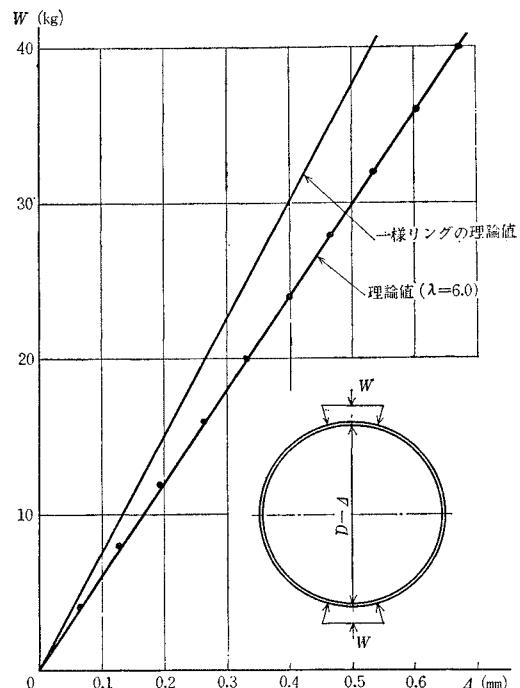
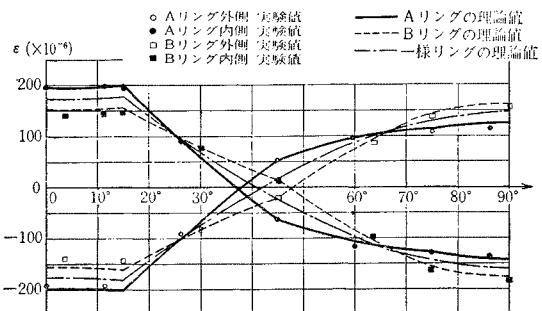
(3) 実験結果および考察

試験体リングの「セグメント継手」のばね定数 k 、したがって、継手剛比 $\lambda (= \pi R k / 2 EI)$ の値を求めるために A リングのみとりだして載荷し、たわみを測定した。その結果を 図-15 に示す。

図-15 によると実験値は $\lambda=6.0$ とした計算値に一致しており、したがって本試験に用いた試験体リングの継手剛比は $\lambda=6.0$ と考えることができる。

A, B リングを千鳥に重ねた試験体の実験結果は、たわみ(鉛直方向の直径の変化)を 図-16 に、ひずみの分布を 図-17 に示し、同時に $\lambda=6.0$ の理論値および

図-16 たわみ実験結果

図-17 $W=40 \text{ kg}$ におけるひずみの分布

継手のない一様リングの理論値を併記してある。

たわみの実験値は理論値とよく一致し、一様リングの場合より約26%大きくなっている。

ひずみの実験値も理論値とよく一致し、ひずみの最大値は一様リングの場合より約14%大きくなっている。

たわみ、ひずみとともに実験値はよく直線性を示しており、試験体の精度は良好であった。

6. 結 論

以上の二軸対称荷重の場合の理論計算および実験結果からつぎのことが明らかになった。

- 1) ここで用いた理論は実験結果とよく一致し、理論の妥当性は証明された。
- 2) 「セグメント継手」の継手剛比が $\lambda = \infty$ では継手のない一様リングと一致するが、 $\lambda < \infty$ では「軸方向ボルト」にせん断力が作用し、この値は λ の減少にしたがって増大する。
- 3) リングの応力分布は λ が小さくなると前記のせん断力の影響で一様リングと異なった分布となり、曲げモーメントの最大値は $\lambda \approx 0$ では一様リングの場合の約2倍になる。
- 4) リングのたわみも応力と同様に λ の減少にしたがって増加する。
- 5) 応力、たわみ、「軸方向ボルト」に作用するせん断力は、ここで採用した条件に関しては、 $\lambda > 9.0$ ではほとんど変化なく、一様リングとの差は小さいが、 $\lambda < 9.0$ では λ の減少にしたがって急激に増加する。
- 6) 以上のことから、 $\lambda < 9.0$ のセグメントリング

では λ の低下による応力、たわみなどの増加を考慮する必要がある。

- 7) 6セグメントリングと4セグメントリングを比較すると曲げモーメント、たわみでは差はほとんどみられないが、「軸方向ボルト」のせん断力、リングの軸力、せん断力では前者の方が継手剛性の影響が大きい。

7. おわりに

ここでは、2軸対称な外圧を受ける場合のセグメントリングについて解析を行なったが、実際のトンネルに作用する土圧の様子は不明な点が多く、このように簡単な取り扱いで十分とは考えられない。しかし、この研究の結果、継手剛性とセグメントの応力の関係について、少なくとも定性的な結論は得られたと思う。今後さらにできるだけ実際に近い土圧に対して解析を行ないたいと思っている。

数値計算の一部は石川島播磨重工 UNIVAC-1107 電子計算機を使用した。

最後に、本研究を進めるにあたりご協力いただいた石川島播磨重工技術研究所 秋田好雄博士、前田豊生博士、藤井登喜男氏ならびに実験を手伝っていただいた安藤祐三君に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 湯浅欽史：たわみ性地下埋設管の室内実験、土木学会論文集、99号、pp. 9
- 2) 強度設計データブック、裳華房、pp. 439
- 3) Henry L. Langhaar: Energy Methods in Applied Mechanics, John Wiley and Sons, Inc.

(1987.7.12・受付)