

東京都立大学工学部 正員 山本 稔

東京都交通局

十本弥三郎

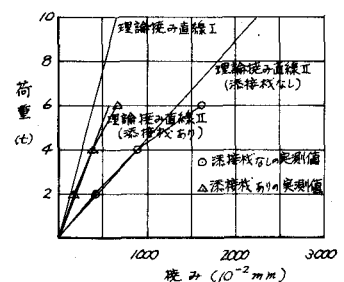
正員 松本正敏

1. まえがき 大断面シールドの1次覆工法として用いられている中子型R.Cセグメントは、6〜10分割されたセグメントをボルトによって結合する形式のものが広く用いられているが、この形式のリンクでは継手部の剛性と強度が劣るため、リングの変形、強度に与える継手の影響は非常に大きい。この継手部の剛性の低下をできるだけ少なくするために、継手位置をずらせて、牛島に組立てる方法が一般に行なわれているが、その効果については不明な点が多い。筆者らは都営地下鉄二本横シールド工区に使用している外径8mの中子型R.Cセグメントを用いて載荷試験を実施し、継手部の剛性の低下と牛島組効果について、たわみの測定値から隣接セグメントへの付加モーメントを確定し、さらに隣接セグメントの応力度の測定結果を合せて、トンネル軸方向ボルトの締付力と牛取組効果の関係等について検討を行なった。

2. 実験方法 外径8m、桁高350mm、8分割のR.CセグメントリングからA型セグメント2片を取り出して作ったボルト結合の突合せ継手を持つ両端ローラ支持のアーチの頂点に200tジャッキで載荷して、頂点から811'間隔に配置したダイヤルゲージで半径方向変位を測定する。次に牛島に組立てられた隣接セグメントが継手に与える影響を調べるために、鋼製の添接板と突合せ継手部両側にあって、軸方向ボルトで締めつけて、単純曲げ試験を行ない、アーチのたわみ、添接板の応力度を測定した。さらにトンネル軸方向ボルトの締付力が、継手部の牛島組効果に及ぼす影響を知るために、ボルトの初期締付力を、 $\sigma=500\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$ 、 $300\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$ 、 $100\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$ の3種類に分けて同様の実験を行なった。ただし、ここにおいてリング形成ボルトは使用せずに単に突合せ継手となっている。

3. 実験結果および考察 中央断面にボルト結合の突合せ継手を持つ単純支持アーチにおけるたわみの実測値を、継手を無視して剛性一様アーチとして計算したたわみの理論値(理論値I)と比較すると、実測値の方が数倍大きい。この実測値と理論値の差は、突合せ継手の存在によって、生じたものである。添接板を取りつけた実験では、アーチのたわみは、添接板のない場合の $\frac{1}{3}$ 程度に減少して、理論値Iに近い値が実測された。これはセグメントの両側に取付けられた添接板が、突合せ継手の開口を拘束するように働いたため、添接板が継手の剛度を上げる効果を有効に発揮していると考えられる。図-1はアーチの頂点での荷重とたわみの関係を示したもので、理論値IIは、剛性一様アーチとして求めたたわみと

図-1 頂点での荷重-たわみ関係



継手の存在によって生じるたわみを合成したものである。継手位置では外力Pによる曲げモーメント

$$M_c = \frac{1}{2} P R \sin \theta = 1.581 P \text{ t-m} \quad (1)$$

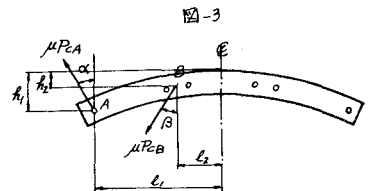
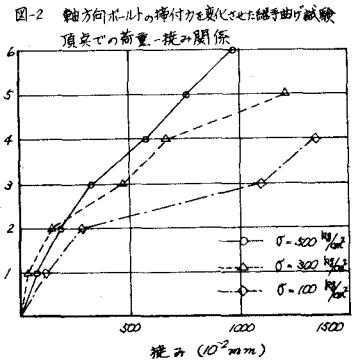
に対して、継手のバネ係数をR、継手の存在によって生じるアーチ頂点の相対回転角を θ とすれば、継手は $M = R\theta$ で表わされるモーメントを発生してつり合

うと考えられる。添接板のない場合のバネ係数を k_1 、添接板をつけた場合のバネ係数を k_2 とすれば、

$$M_1 = k_1 \theta \quad (2)$$

$M_2 = M_0 - M_1$ (3) として求められる。実験の結果から外力 $P = 1^t$ に対して、 $M_1 = 0.297 \text{ t}\cdot\text{m}$ 、 $M_2 = 1.342 \text{ t}\cdot\text{m}$ となった。すなわちリング形成継手(突合せ継手)を不らせて牛島に組まれたセグメントリングでは、外力による曲げモーメントに対して、突合せ継手部はその15%を分担するにすぎず、隣接セグメントへの付加モーメントが85%にも達することがわかった。

この実験結果から、添接板とセグメントの間に「すれ」が発生するまでは、添接板は継手の剛度を上げる効果を有効に発揮していることが明らかになったが、「すれ」の発生する荷重は、軸方向ボルトの初期締付力によって異なる。実験の結果、図-2のようにボルトのイニシャルストレスが、 $\sigma = 500 \text{ kg/cm}^2$ 、 300 kg/cm^2 、 100 kg/cm^2 に対して、「すれ」発生荷重は 4^t 、 2^t 、 1^t であった。これに対し、軸方向ボルトの締付力と「すれ」発生荷重の関係を理論的に求めてみよう。添接板は図-3に示すように、中央にたいして対称な6点でボルトによってセグメントに締めつけられている。添接板とR.Cセグメントの摩擦係数を μ 、ボルト1本の締付力を P_0 として、R.Cセグメントが外力を受けたとき、添接板のA,B点で図のような力が働いて、つり合いの状態にあると仮定すると、A,B点の鉛直分力の間には $\mu P_0 \cos \alpha = \mu P_0 \sin \beta$ (4) の関係がある。一方A点ではボルト1本、B点ではボルト2本で締めつけられている



から、A,B2点の締付力 P_A と P_0 の間には $P_0 = 2 P_A$ (5) の関係がある。次にアーチクラウンの上縁に関するモーメントは $M = \mu P_A \{ (l_1 - l_2) \cos \alpha + l_1 \sin \alpha + 2 l_2 \sin \beta \}$ (6) で与えられる。セグメントの添接板に「すれ」が起るとき、式(6)で与えられたモーメントは極大になるはずだから

$$\frac{dM}{d\alpha} = \mu P_A \{ -(l_1 - l_2) \sin \alpha + l_1 \cos \alpha + 2 l_2 \cos \beta \frac{d\beta}{d\alpha} \} = 0 \quad (7)$$

となる。式(7)を解いて $\alpha = 36.2^\circ$ がえられる。上記計算より「すれ」の発生するときのモーメントは $M = 1.583 \mu P_A$ (8) となる。添接板はセグメントの両側に取りつけられているので、外力 P による添接板にかかる曲げモーメント $M = 1.581 P \text{ t}\cdot\text{m}$ が $2M$ 以上になると、「すれ」が起るとして、「すれ」が発生するときの外力 P と、締付力 P_0 の間には

$$P = \frac{2 \times 1.583}{1.581} \mu P_A = 2.002 \mu P_A \quad (9)$$

の関係がある。ここで $\mu = 0.5$ として、 $\sigma = 500 \text{ kg/cm}^2$ 、 300 kg/cm^2 、 100 kg/cm^2 の締付力に対して「すれ」発生荷重を求めると、それぞれ $P = 402.3^t$ 、 271.3^t 、 98.05^t となる。実験結果とかなりよい近似を示している。

4. おまけ 今回の実験により牛島に組立てられたR.Cセグメントのボルト結合の突合せ継手は、外力による曲げモーメントの15%を分担するにすぎず、残りの85%は付加モーメントとして、隣接セグメントに負担されることが明らかになった。したがって今後のセグメントの設計では、外力による曲げモーメントとして、剛性一様リングに生じる曲げモーメントの1.85倍の値を用いて計算することを提案したい。また牛島組効果を有効に発揮させるためには、軸方向ボルトを設計荷重程度の荷重に対して「すれ」が起らないように締めつけるよう規定することが必要と思われる。