

【ノート】

ボルト継手を有するセグメントリングの
変位特性の載荷実験における一例DEFORMATIONAL CHARACTERISTICS OF SEGMENT RING WITH
BOLTED JOINT AT LOADING TEST

藤 本 徹*

By Toru FUJIMOTO

1. ま え が き

セグメントリングは坑内で千鳥組がなされるが、これにより、セグメント継手の存在によるリング構造の非一体性を幾分かカバーすることができる。しかし、このように千鳥組がなされたリングがどの程度一体化した挙動を示すかという点については余りよく知られていない。著者はもとよりセグメント継手ボルトにより結合されたセグメントリングが完全に一体的な弾性挙動を呈するものとは考えていないが、リングの千鳥組構造を実施すればかなり一体化が可能であろうし、また、実用上弾性解析によって近似しうるセグメントリングが組立てられると考えた。こうして実際に組立てた千鳥組セグメントリングの載荷実験を行い、リング各点の変位を測定し、一体としての仮定に基づいた理論解と比較した。

2. 実験方法

図-1、写真-1 は本実験に用いた装置の概要で、円形の鉄筋コンクリート擁壁内部に外径 6400φ の鉄筋コンクリート製セグメントを 2 リング重ねて千鳥組を行いセ

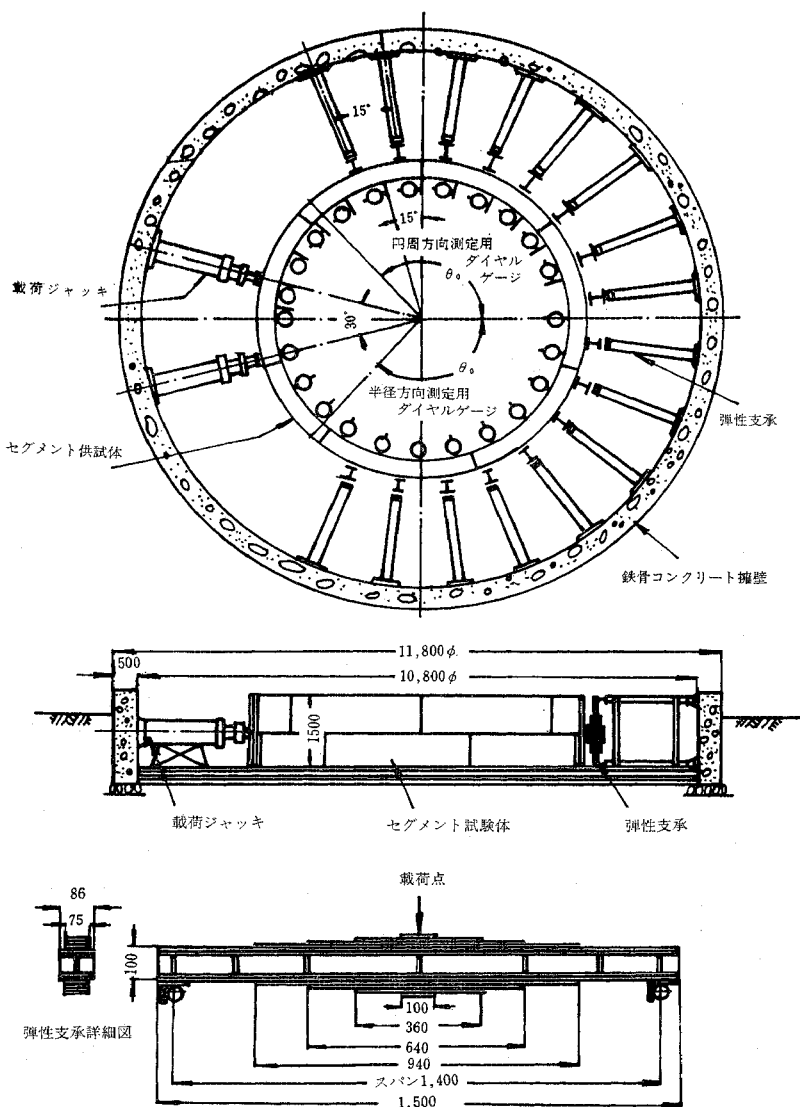


図-1 実験装置概要

* 正会員 工博 (株) 熊谷組豊川工場製造部

ットした。このとき用いたセグメントおよび継手の概要を図-2および図-3に示す。セグメントの主鉄筋の径は16φ、コンクリートの水中標準テストピースの σ_{28} は470 kg/cm²であった。荷重装置は一端にトンネル上方荷重に近いものに相当するものとして油圧ジャッキによる荷重を30°の間隔で対称に2か所あたえ、他方、リング下部の弾性支承領域には地盤反力発生機構に相当するものとして図-1のごとき弾性支承を配置した。実験実施に先立ち前夜継手ボルトを締付けて引張応力度がすべて均一に2200 kg/cm²になるようにしたが荷重直前に測定した結果これらのイニシャルストレスは平均1800 kg/cm²に減少していた。

リング各点の変位はダイヤルゲージにより測定した。

このダイヤルゲージはセグメントリングの片側半円周において15°間隔で半径方向の変位 W を測定するため

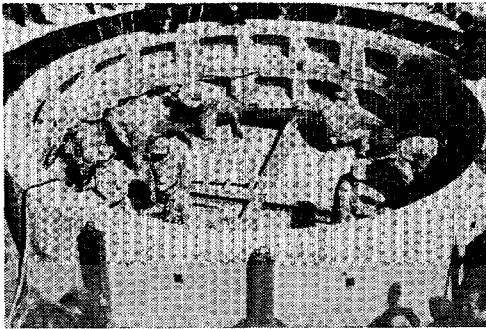


写真-1 実験状況

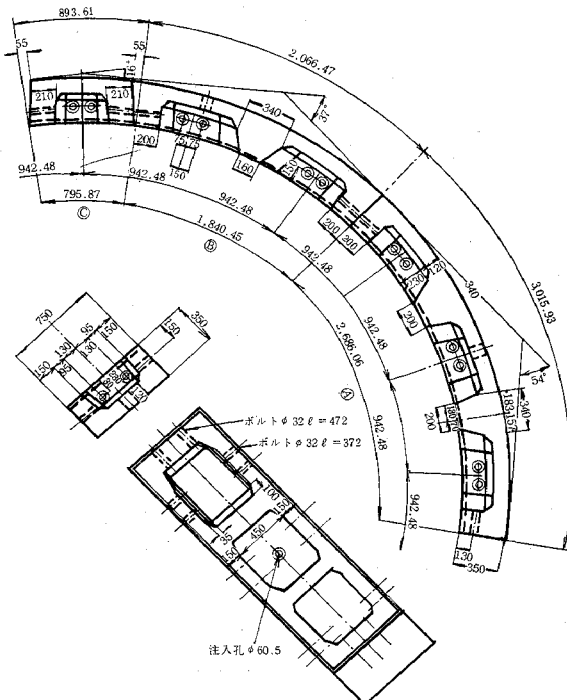


図-2 鉄筋コンクリートセグメント概要図

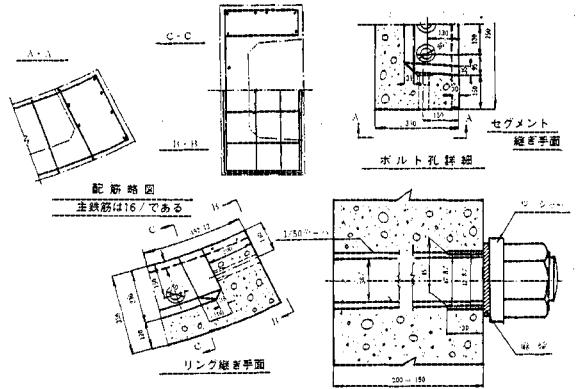


図-3 継手部概要図

に取付け、他の片側半円周には同様15°間隔で円周方向変位 V の測定のためにダイヤルゲージを取付けた。

3. セグメントリングの変位解析法の概要

測定値と比較するための理論解の解析方法は円筒殻の曲げ理論に基づくもので、猪瀬・高田が提案したものを応用したものである²⁾。簡単に要点だけを述べると、セグメントリングは図-4に示すごとく、上方荷重を受けると弾性支承による反力を受けてつり合いを保つ。このときの各反力の大きさはその点の変位 W に比例する。したがって、円筒殻の曲げ理論に基づくセグメントリングの基本方程式は式(4)のように与えられる。いま、解析に先立ち、以下関係式中に用いる各記号についての説明を行う。ただし、セグメントはトンネル軸方向単位幅について考えるものとする。 W :[cm]セグメントリングの半径方向の変位でリングの外側に向うものを正とする。 V :[cm]セグメントリングの円周方向の変位でインバートから円周にそって頂点に向うものを正とする。 θ :セグメントリング上の任意の点と中心点を結ぶ線が鉛直軸、特にインバートを含む軸となす角度。 θ_0 :弾性支承領域を示す角度。 a :[cm]セグメントの中立円半径でこの算定には次のような方法によった。セグメントの構造は図-2に示すがここにおいて継手ボルトを取付けるための凹みのある部分はコの字形の断面であり、この断面での中立軸の位置とセグメントリングの中心からの距離を a_1 とし、凹みのある部分のセグメント内縁にそった弧長の総和がセグメント内縁円周に対する比率を $n_1\%$ とする。一方、凹みのない部分においては断面形状は矩形であり、上記の a_1n_1 に相当するものを a_2n_2 とすると、 a は次式で求められる。

$$a = \frac{a_1n_1 + a_2n_2}{100} \dots\dots\dots(1)$$

E :[kg/cm²]セグメントの弾性係数で、実験に用いたセグメントを打設する際に採取したコンクリート供試

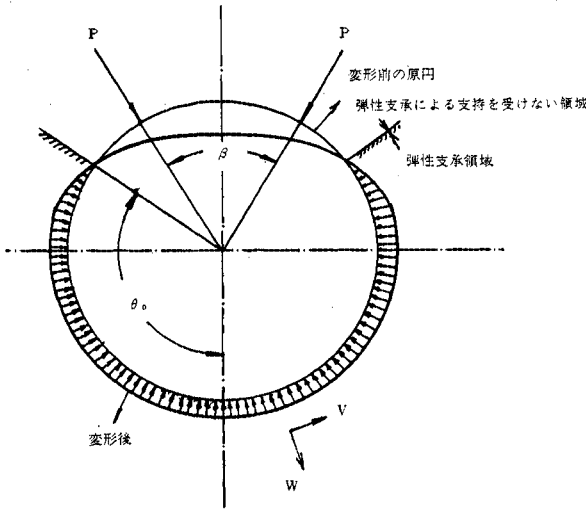


図-4 セグメントリングに作用する荷重

体でセグメントと同条件の下に養生したものをコンプレッソメータで測定した静弾性係数である。

I : [cm⁴/cm] セグメントの断面二次モーメントであり上記の凹みのある部分の断面二次モーメントを I_1 , 凹みのない部分では I_2 とすると, セグメント幅を B [cm] とすれば, I は a を求めた方法と同じ考え方により次式で求められる。

$$I = \frac{I_1 n_1 + I_2 n_2}{100 B} \dots\dots\dots (2)$$

h : [cm] セグメントの桁高で凹みのある部分の断面積を A_1 とするところ断面の桁高 h_1 は次式で定義する。

$$h_1 = \frac{A_1}{B}$$

凹みのない部分の桁高はそのまま h_2 とすると h は次式で表わされる。

$$h = \frac{h_1 n_1 + h_2 n_2}{100} \dots\dots\dots (3)$$

K : [kg/cm³] 弾性支承の反力係数で今回の実験のために作成したものを検定した結果 3 kg/cm³ の地盤に相当するものであった。 η : セグメント継手の影響を考慮した曲げ剛性の有効率である^{1), 3)}。 M : [kg・cm/cm] セグメントに発生する曲げモーメントでリング内側に引張を生ずるものを正とする。 N : [kg/cm] セグメントに発生する軸力で断面に引張を与えるものを正とする。 Q : [kg/cm] セグメントに発生するせん断力で, θ をリングにそって反時計回りに計ったものを正とすると, セグメント微小四辺形に時計回りの方向に回転を与えるように作用するものを正とする。 P : [kg] セグメントリングに作用する集中荷重。 $K_1, K_2, \dots, K_4'', \dots, C_1, \dots, K_{01}$: 積分定数。

セグメントリングの基本方程式は

$$\frac{d^4 W}{d\theta^4} + 2 \frac{d^2 W}{d\theta^2} + W = -C - \frac{a^4}{\eta EI} F(\theta) \dots\dots (4)$$

$$12 \left(\frac{a}{h} \right) \left(\frac{dV}{d\theta} + W \right) = C \dots\dots\dots (5)$$

ここに $F(\theta)$ を荷重項とすると, 上式を連立に解いて W, V を求めることができる。まず, 弾性支承領域 ($0 \leq \theta \leq \theta_0$) においては

$$\frac{d^4 W_1}{d\theta^4} + 2 \frac{d^2 W_1}{d\theta^2} + W_1 \left(1 + \frac{Ka^4}{\eta EI} \right) = -C_{01} \dots\dots\dots (4)'$$

これを解いて

$$W_1 = K_1 \cosh m\theta \cos n\theta + K_2 \sinh m\theta \sin n\theta - \frac{C_{01}}{1 + Ka^4/\eta EI} \dots\dots\dots (6)$$

次に接線方向変位 V は

$$V_1 = K_{01} + \left\{ \frac{1}{12} \left(\frac{h}{a} \right)^2 + \frac{1}{1 + Ka^4/\eta EI} \right\} C_{01} - \frac{1}{m^2 + n^2} \{ (m \sinh m\theta \cos n\theta + n \cosh m\theta \cdot \sin n\theta) K_1 + (m \cosh m\theta \sin n\theta - n \sinh m\theta \cos n\theta) K_2 \} \dots\dots\dots (7)$$

ただし

$$\left. \begin{aligned} m &= \sqrt{\frac{-1 + \sqrt{1 + Ka^4/\eta EI}}{2}} \\ n &= \sqrt{\frac{1 + \sqrt{1 + Ka^4/\eta EI}}{2}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (8)$$

次に弾性支承による支持を受けない領域 ($\theta_0 \leq \theta \leq \pi$)

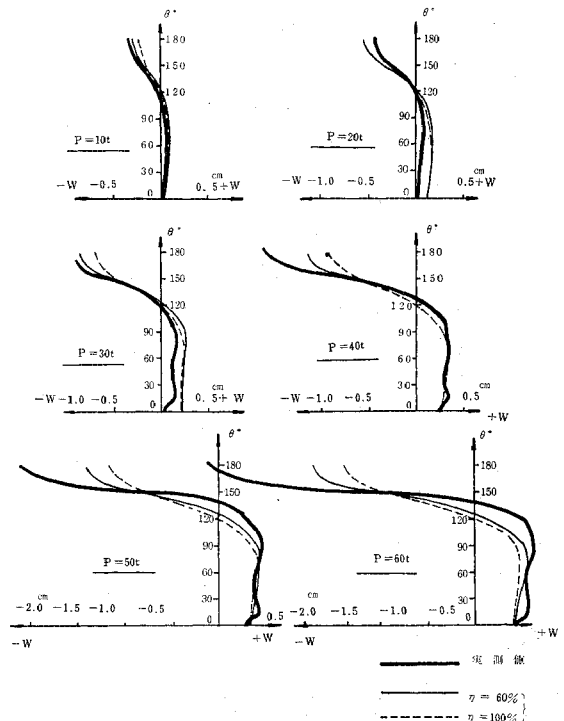


図-5 半径方向変位

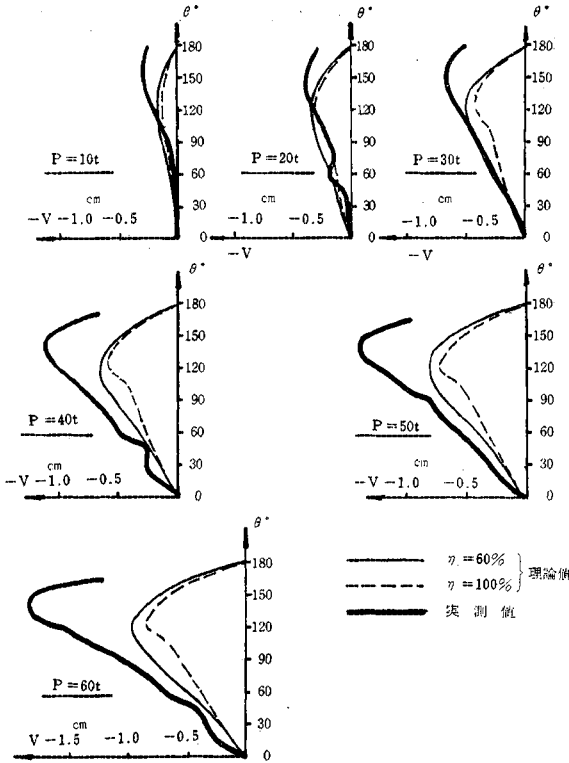


図-6 接線方向変位

においては

$$\frac{d^4 W_2}{d\theta^4} + 2 \frac{d^2 W_2}{d\theta^2} + W_2 = -C_{02} \dots\dots\dots (4)''$$

これを解いて

$$W_2 = (K_1' + K_2' \theta) \cos \theta + (K_3' + K_4' \theta) \sin \theta - C_{02} \dots\dots\dots (9)$$

接線方向変位 V は

$$V_2 = K_{02} + \left\{ \frac{1}{12} \left(\frac{h}{a} \right)^2 + 1 \right\} C_{02} \theta - K_1' \sin \theta - (\cos \theta + \theta \sin \theta) K_2' + K_3' \cos \theta - (\sin \theta - \theta \cos \theta) K_4' \dots\dots\dots (10)$$

次に、曲げモーメント、せん断力、軸力などは次式で与えられる。

$$M = \frac{EI}{a^2} \left(\frac{d^2 W}{d\theta^2} + W \right) \dots\dots\dots (11)$$

$$Q = -\frac{1}{a} \frac{dM}{d\theta} \dots\dots\dots (12)$$

$$N = \frac{EI}{a^3} C + \frac{M}{a} \dots\dots\dots (13)$$

4. 変位曲線に対する観察

セグメントの半径方向変位 W は 図-5 に、接線方向変位 V は 図-6 に示した。図から、W の実測値を各荷

重段階ごとに観察してみると、まず P=10~20 ton の段階では実測値が理論値を下回っている。次に P=30~40 ton の段階において、理論値と実測値とはかなり近接し、さらに荷重を増加すると逆に実測値が理論値を上回るような結果を示している。さきに述べたように今回、曲げ剛性の有効率 η なる概念を導入してセグメントリングの特性を説明する一つの手掛りとしたが、これよりセグメントリングのみかけの剛度は ηEI となる。次に図-6 に示す V-θ 曲線について観察を行うと、まず、測定値はいずれも頂点付近でずれを示しており、零とならない。これは実験方法がセグメントリングを力学的に対称であることを実現させることが不可能であったために、セグメントリングに載荷する際に、リング全体が載荷荷重や支持状態に不均衡を生じ、このためにずれが生じたと考えられる。

次に、η は荷重条件や継手の構造および特性により変化し、同一リング内でもリング各点において異なると思われるから、今回の実験において P=30~50 ton の段階で、理論値と実験値とが頂点を除く各点で接近しているが、特に P=40 ton の場合、η=60% とした理論値と実測値が特にリング下方で合致していることにより、η=60% なる値を η の一例として見出してもこの η の値はあくまで本設計のセグメントを用いて上述の荷重条件の下に得られた値であり、他の設計条件のセグメントや異なった荷重状態に対して広く適用しうるものではない。したがって、この場合、得られた η の値はあくまで地中における、あるセグメントリングを想定した場合の η を推定する一つの試みであり、現実に近い状況下にあるとはいえずあくまで参考資料に過ぎない。そして、あらゆる場合に適用しうる η の値を求めるためにはセグメントの構造や継手の性質、および荷重条件などを考慮した多くの研究にまつことは当然である。

謝 辞 この研究は 1963 年に行ったものであるが、当時の熊谷組専務取締役 故加納俊二氏の温かい励ましをいただきに行ったものであり、ここに心から深甚の謝意を表します。また、その際には京都大学教授 村山朔郎博士（現名誉教授）に終始懇切なご指導を賜わり、謹んで御礼申上げる次第であります。

参 考 文 献

- 1) 鉄筋コンクリートセグメント および スチールセグメント 強度試験について：株式会社熊谷組技術研究所報文第 1 号，1963.6.
- 2) 猪瀬寧雄・高田孝信：関門国道捲立ての強度について，土木研究所報告第 86 号の 4，1952.3.
- 3) 土木学会・日本下水道協会共編：シールド工用セグメント，68 頁，1973.11.

(1975.10.13・受付)