

RCセグメント継手部の構造モデル化に関する試験とその考察

TESTS AND CONSIDERATION FOR MODELING SEGMENT JOINTS

西野健三* 近藤寛通** 吉田和夫***

By Kenso NISHINO, Hiromichi KONDO and Kazuo YOSHIDA

Blocks used to line a shield tunnel, usually made of concrete or steel, are called segments. The completed lining is a cylindrical structure that has a number of joints that must be bolted on-site. So lining design is relatively complicated, and it is necessary to understand how the joints behave since they affect the stiffness and performance of the lining. For this reason, a variety of full-scale tests have been carried out to investigate deformation and stress-transmitted properties. Segment joints can be divided in two types, segment joints (joints between pieces) and ring joints. Preparatory to modeling these structures, bending and shearing tests were carried out. And as a rational segment ring design, a framed structure model with rotational spring and shearing spring in a beam was assumed and the bending test on the test pieces, constructed alternately, was performed to determine reproducibility.

As a result, the stress transmission mechanism at each joint could be obtained. An understanding of this mechanism proved useful in employing ring joints as mechanical joints.

1. ま え が き

シールド工法は、今や都市トンネル工法として代表的な位置を占めている。この工法は、セグメントと呼ばれる工場生産されたブロックを用いることにより、掘進と覆工といった諸作業を迅速かつシステムチックに行うことができるという点で非常に優れていると言えるが、当然の結果として、構築された覆工は、多数の継手を有する構造となり、その設計における力学的取り扱いをかなり複雑なものにしている。しかしながら、これらの継手は、覆工の剛性および耐力に関して支配的な役割を果たしていると考えられるので、合理的なセグメントの設計を行う上で、その挙動把握が重要となってくる。

一般に継手は、リングを形成するセグメント継手と、リング相互をつなぐリング継手に分類される¹⁾(図-1参照)が、この内、リング内

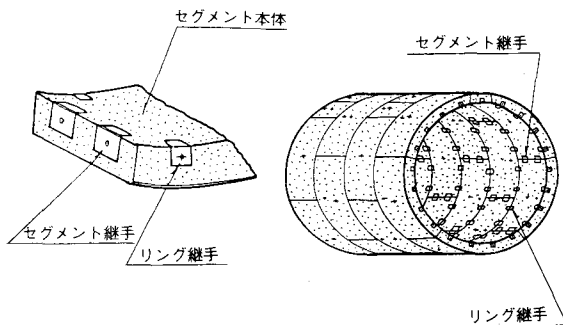


図-1 セグメント組立状況

における数個のセグメント継手は、継手構造上の理由から曲げに対して弱点となるので、現場ではトンネル

*	工修	中部電力株式会社	中央送変電建設所	土木工事課	(〒456 名古屋市熱田区横田 2 丁目 3 番 24 号)
**		中部電力株式会社	中央送変電建設所	土木工事課 副長 (	同 上)
***		中部電力株式会社	中央送変電建設所	土木工事課 課長 (	同 上)

縦断方向に重複しないように千鳥組される。その結果、セグメント継手部分の剛性および耐力が上がる添接効果が生じ、セグメント継手の曲げモーメントの一部が、千鳥に組まれた隣接セグメントを通じて伝達される。このことが一方、覆工の構造モデル化を複雑にしている。現状では、これら継手部の挙動把握および千鳥組の伝達メカニズムの究明が十分になされていない^{1),2),3)}ため、覆工を曲げ剛性一様なリングとして設計し、継手に関しては、主としてセグメント継手の曲げ耐力のみが検討されている。

一方、セグメントの設計に関する従来の代表的な研究としては、山本らの^{4),5)}研究、結城らの^{6),7)}研究、村上らの^{8),9)}研究、ならびに河田らの^{10),11)}研究があげられる。これらの研究に共通している点は、セグメントの継手を設計モデルの中に取り入れようとする考え方にある。まず、山本らの研究では、セグメント継手の曲げ剛性低下を回転バネ（弾性ヒンズ）を用いて考慮している。これは、セグメント継手において次式の関係を満たすバネを設定するものである。

$$M = K_{\theta} \cdot \theta \tag{1}$$

ただし、 M は作用曲げモーメント、 θ は継手部の回転角、 K_{θ} は回転バネ定数を、それぞれ示す。次に、結城らの研究では、この回転バネの他に、リング継手に対する評価として、リング継手を剛結とし、その伝達力を考慮している。また、村上らの研究では、回転バネと伝達力を用いて継手を考慮する一方、回転バネ定数に関しては、その推定方法を提案している。河田らの研究では、回転バネの他、リング継手に対しても、次式を満たすバネ定数をもったせん断バネを用いて、大口径 R C セグメントを設計している。

$$S = K_s \cdot \delta_s \tag{2}$$

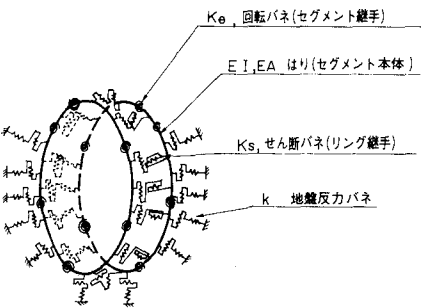
ただし、 S は作用せん断力、 δ_s は継手部のずれ変形量、 K_s はせん断バネ定数を、それぞれ示す。

著者らは、これらの背景を鑑み、合理的なセグメントの設計モデルとして、河田らの骨組解析モデルに地盤反力バネを付加したものを想定し¹²⁾（図－2 参照）、まず、各継手部の変形および耐力に関する挙動の把握、ならびに、覆工部分に対する構造モデル化の妥当性を調べる目的で、表－1 に示す各試験を行った¹³⁾。

これら一連の試験での着目点としては、千鳥組セグメントに曲げが作用する場合の挙動把握、特に、その際のリング継手の役割を究明し、現行の設計ではセグメント継手に準じて取り扱われているリング継手に関し、その力学的機能を明確にすることにある。

2. 試験の目的と概要

各試験の概要を表－1 に表す。試験は大きく 3 つに分けられる。すなわち、セグメント継手部曲げ試験、リング継手部せん断試験、および千鳥組曲げ試験である。試験に用いたのは、外径 4.5 m、厚さ 0.2 m、



図－2 セグメントの設計モデル

表－1 各試験の概要

試験記号	概 要	試験内容
[MAO] [MAI] [MNAO] [MNAI]		セグメント継手部 {正曲げ 曲げ試験 (負曲げ) [軸力なし] セグメント継手部 {正曲げ 曲げ試験 (負曲げ) [軸力あり]
[SY①] [SY②] [SX]		リング継手部 (標準) せん断試験 (補強) [半径方向] リング継手部 せん断試験 [接線方向]
[MBO] [MBI]		千鳥組曲げ試験 {正曲げ (負曲げ)
[MO] [MOO] [FS]		セグメント単体曲げ試験 セグメント継手部 引張り試験

部アンカー筋に若干の補強をしたものの試験である。

試験の供試体および試験方法を図-5に、リング継手部の詳細構造を図-6に、それぞれ示す。主たる測定項目は、ずれ変形(δ_s)、ならびに、継手板、アンカー筋、ボルトなどのひずみである。

(3) 千鳥組曲げ試験

この試験は、回転バネ、せん断バネを含めた構造解析モデルの妥当性を確認するためのものである。なお、作用曲げモーメントの方向については、セグメント継手部曲げ試験と同様、正曲げ、負曲げの両方について行った。ただし、軸力は導入していない。

試験の供試体および試験方法を図-7に示す。主たる測定項目は、たわみ(δ)、セグメント継手部の回転角(θ)ならびに、鉄筋、ボルトなどのひずみである。

以上の各試験の他に、セグメント単体の曲げ試験[M0]、[M00]、セグメント継手部引張り試験[FS]、および各種材料試験を実施し、上記8試験の結果の考察および解析検討の際に参考とした。図-8にセグメント継手部引張り試験の概要を示す。また、セグメント単体曲げ試験は、千鳥組曲げ試験の供試体形状を考慮し、はり幅1.0 mのもの([M0])と0.5 mのもの([M00])の2種類を行った。なお、ボルトはM22(8.8)を用い、その締め付けトルクとしては、全試験とも1500 kgf・cmとした。その結果、ボルトには、初期軸力として3300~4500 kgf が導入された。

3. セグメント継手部曲げ試験の結果とその考察

図-9は、軸力がない状態での正曲げ試験[MA0]における曲げモーメントと継手回転角との関係を示したものである。かなりの非線形性を示すが、図中に一点鎖線で示したように概ね3本の直線で近似できる。測定されたひずみやひび割れ状況などから判断すれば、まず、継手板の弾性変形が生じ、次に継手板の塑性変形と圧縮側のコンクリートの圧壊、そして両者の進行と言った8段階を経て破壊に至ったと考えられる。

図-10は、上に述べた正曲げ試験の他、負曲げ試験[MA1]と、さらに軸力が導入された状態($N=50 \text{ tf}$)での正曲げ試験[MNA0]、負曲げ試験[MNA1]の結果とを比較して示したものである。軸力のない状態では、最終曲げ耐力($M_R=3.7 \text{ tf}\cdot\text{m}$ (正曲げ), ($M_R=2.6 \text{ tf}\cdot\text{m}$ (負曲げ))も、剛性も正曲げの方が大きな値を示している。これは、継手ボルトの位置がトンネル内側に片寄っている(セグメント厚さの約 $1/8$)ためであると考えられる。また、これに対し、軸力導入下での試験では、正、負の差が小さく、かなりの荷重まで直線性を示している($K_\theta \approx 3.0 \times 10^7 \text{ kgf}\cdot\text{cm/rad}$)が、軸力が導入されていない試験では、特に負曲げの場合に著しい非線形性を示している。

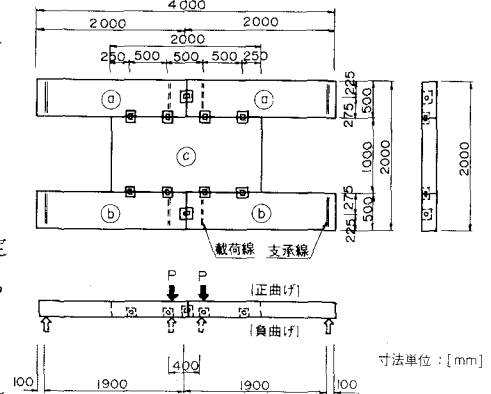


図-7 千鳥組曲げ試験

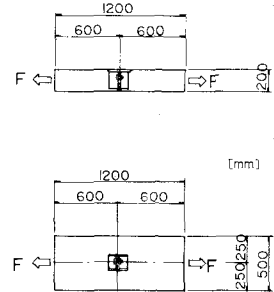


図-8 セグメント継手部引張り試験

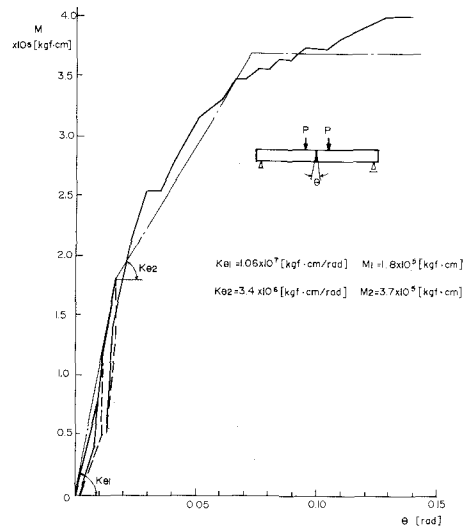


図-9 曲げモーメントと継手回転角(MA0)

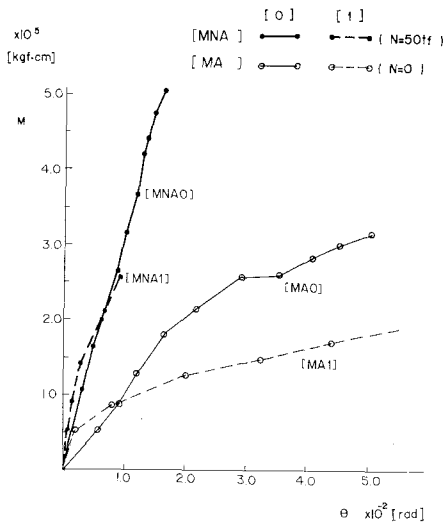


図-10 曲げモーメントと継手回転角の比較

図-11は、図-10における継手回転角 θ が0.01

rad と 0.005 rad に対する回転バネ定数(割線勾配)と導入軸力との関係を示したものである。両者の関係は、ほぼ直線的に変化しているのがわかる。なお、着目した θ の値については、実用上のセグメントの回転角と¹²⁾考えた値である。

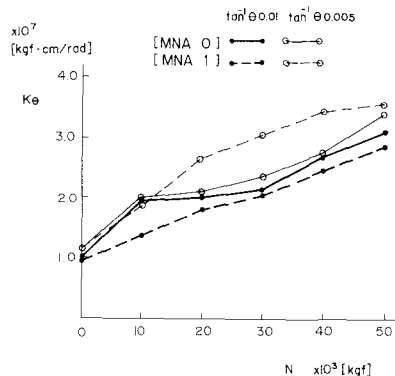


図-11 回転バネ定数と軸力

図-12～14は、各試験[MA0]、[MA1]における荷重と継手板およびボルトのひずみとの関係を示したものである。なお、ひずみ測定位置は図-4中に示すとおりである。両試験とも、载荷初期の段階から、非線形性を示し、その傾向は負曲げ試験の方が著しい。これに関連して、セグメント継手部の引張り試験の結果を示したものが図-15～18である。図-15と図-12、13、また、図-16と図-14、それぞれ比較すれば、継手部に曲げモーメントを受ける場合の継手板挙動は、継手部に引張り力を受ける場合とはほぼ同じであると考えられる。この見地に⁹⁾立った研究に村上らの研究があるが、それ

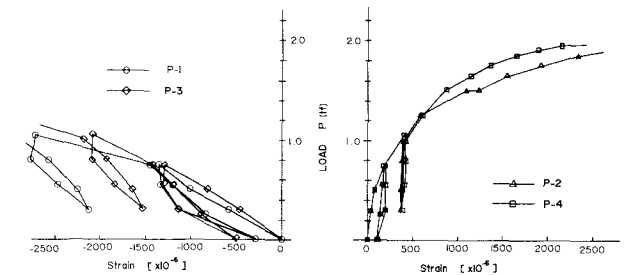


図-12 荷重と継手板ひずみ[MA0]

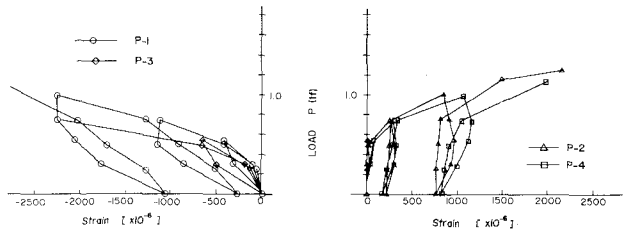


図-13 荷重と継手板ひずみ[MA1]

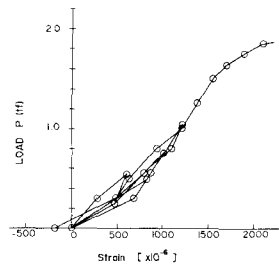


図-14 荷重とボルトひずみ[MA0]

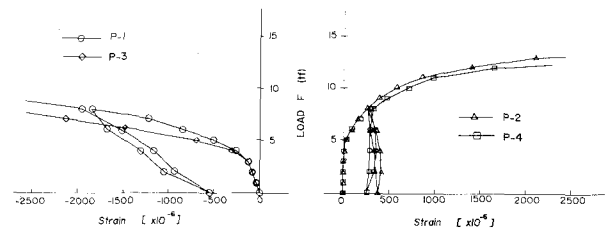


図-15 荷重と継手板ひずみ[FS]

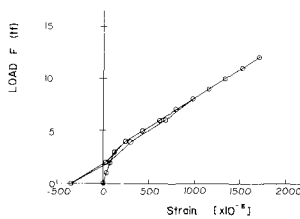


図-16 荷重とボルトひずみ[FS]

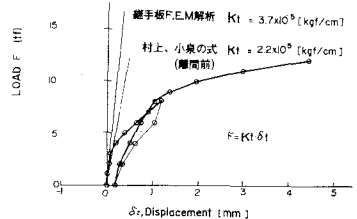
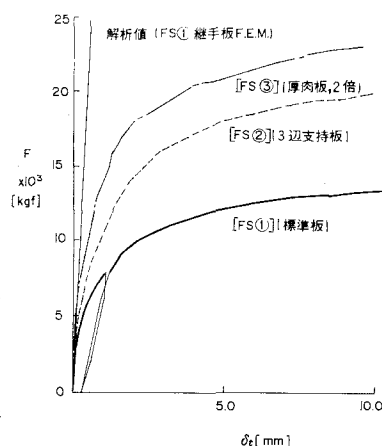


図-17 荷重と継手開口量[FS]

による引張りバネ定数、および継手板 F. E. M. 解析値との比較を図一 17 に示す。なお、ここでの引張りバネ定数とは次式により定めるものである。

$$F = Kt \cdot \delta_t \quad (3)$$

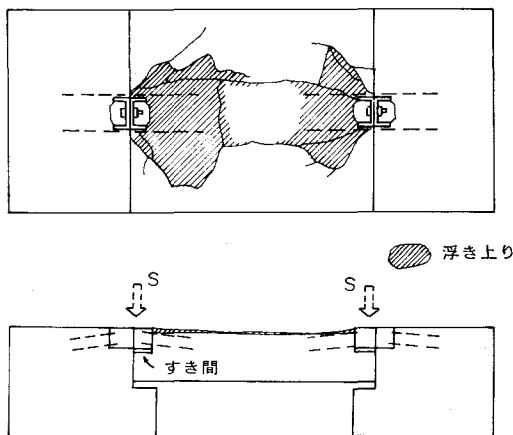
ただし、F は作用引張り力、 δ_t は継手部の開口量、 K_s は引張りバネ定数を、それぞれ示す。村上、小泉の式は、図一 17 において、 $F = 5.0$ tf 付近での値であるが、これを図一 14 と図一 16 の関連より、継手部の曲げモーメントに換算すれば、 $M = 0.5$ tf・m となり、およそこの範囲では、継手板の挙動も線形であり、弾性解析を前提とすれば、工学的に有意義な値を推定していると評価できる。引張り試験は実際のセグメントにおける標準的なものの他に、継手板を補強したもの ([FS②], [FS③]) についても実施した。図一 18 にその結果を示すが、これによれば、変形挙動において初期勾配がそれほど変わらないものの、補強したものの最終耐力は上がっている。



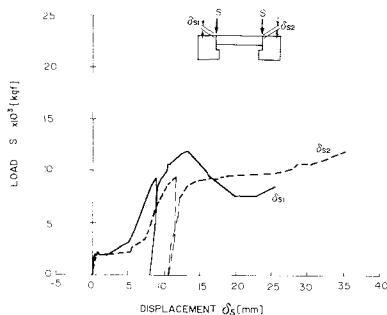
図一 18 セグメント継手部
引張り試験結果の比較

4. リング継手部せん断試験の結果とその考察

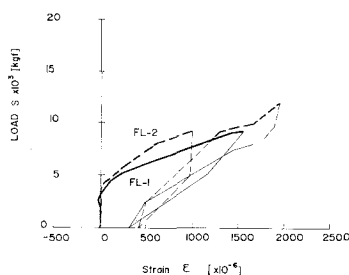
図一 19 ～ 22 は、実際のセグメントと同じ標準的なリング継手構造をもつものの半径方向荷重試験 [SY①] の結果を示したものである。図一 19 は、その破壊状況であるが、ひび割れは、せん断力が作用した時に引き上げられる方の継手金具の周辺から発生し、最終荷重で継手金具は、コンクリートとともに浮き上がり、その下にすき間が生じている。図一 20 は、作用せん断力とずれ変形量との関係を示したものである。ほとんど変形が生じない状態の後、荷重 $S = 2.0$ tf 付近で急激にずれ変形のみが進み、その次に、荷重 $S = 12.0$ tf までは、荷重とずれ変形量との関係が、ほぼ線形に変化して破壊へと進行しているのがわかる。この



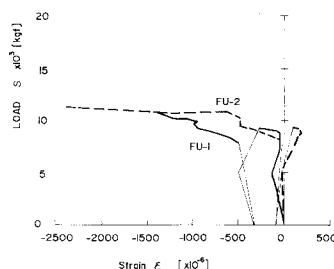
図一 19 破壊状況 [SY①]



図一 20 荷重とずれ変形量 [SY①]



図一 21 荷重とアンカー筋ひずみ [SY①]



図一 22 荷重とアンカー筋ひずみ [SY①]

ほぼ直線的な部分の勾配、すなわちせん断バネ定数は、 $K_s = 1.8 \times 10^4$ kgf/cm である。図-21、22は、荷重とアンカー筋のひずみとの関係を示したものであるが、図-20における荷重 $S = 3.0$ tf 付近からの直線的な変化と、図-21に示すアンカー筋ひずみの変化の対応が注目される。これらの状況および図-19に示す継手の破壊状況より総合的に判断すれば、

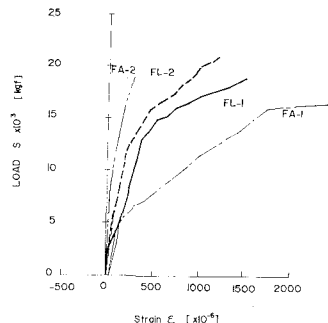
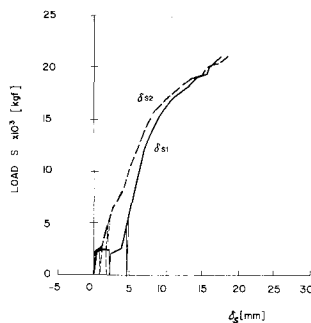


図-23 荷重とずれ変形量〔SY②〕 図-24 荷重とアンカー筋ひずみ〔SY②〕

リング継手部の挙動としては、まず、継手金具およびコンクリート面の摩擦により、ほとんど変形しない段階があり、次に継手金具のすべりおよびコンクリートとの剥離が発生する。その後回転変形を伴う継手金具全体の引き上げなる状況が考えられる。これに対し、アンカー筋に補強したものの試験〔SY②〕結果を図-23、24に示す。剛性はあまり変化しないものの($K_s = 2.0 \times 10^4$ kgf/cm)、耐力は約2倍となり、著しい補強効果が得られた。図-24は、そのアンカー筋のひずみであるが、荷重の初期段階から効果的に働いていることがわかる。なお、標準的な継手のせん断試験においては、ボルトの破断よりアンカー筋の破断が先行した。(ひずみ測定位置、図-6参照)

接線方向のせん断試験〔SX〕で得られたずれ変形およびひずみなどの挙動は、半径方向の各試験のものと同様な傾向であったが、剛性および耐力は七回っていた($K_s = 2.5 \times 10^4$ kgf/cm、 $S_{max} = 25.0$ tf)。

5. 千鳥組曲げ試験の結果とその考察

(1) 試験の結果と考察

図-25は、正曲げ試験〔MB0〕の破壊状況と変形状態を示したものである。図中の数字は、ひび割れが発生した荷重レベルを示しており、曲げによるひび割れ他、リング継手付近に比較的早くひび割れが発生している。これは、リング継手部の破壊が先行したためであると考えられる。

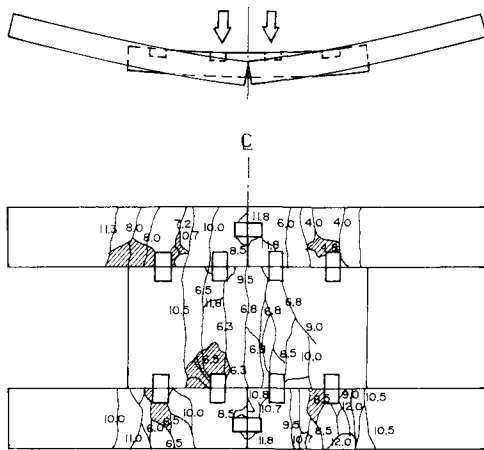


図-25 破壊状況〔MB0〕

図-26、27は、正、負曲げ試験における◎部材中央(図-7参照)での荷重とたわみとの関係を示したものである。ここで示す図中(図-26～30)の荷重 P は他の試験との関連を考慮し、幅1.0 m当りの荷重に換算してある。なお、最終荷重は、正、負曲げそれぞれ、12 tfと10 tfであり、それに対する曲げ耐力は、 $M_r = 10.2$ tf・m〔MB0〕、 $M_r = 8.5$ tf・m〔MB1〕であった。

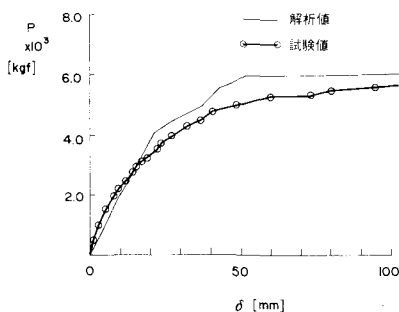


図-26 荷重とたわみ〔MB0〕

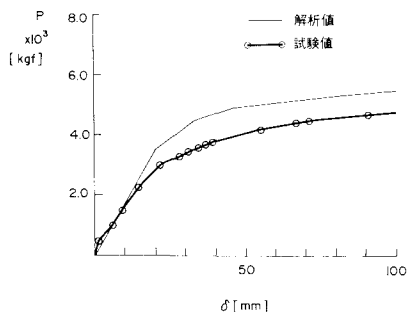


図-27 荷重とたわみ〔MB1〕

図-28、29は、作用荷重レベルに対する、図中に示す継手部と◎部材中央に発

生ずる曲げモーメントの変化を示したものである。継手部の曲げモーメントは、すでに行われているセグメント継手部曲げ試験〔MA0〕、〔MA1〕で得られた曲げモーメントと継手回転角との関係

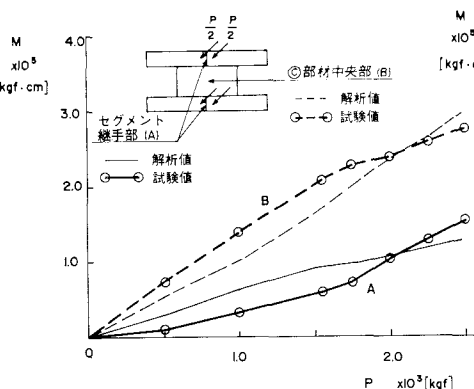


図-28 曲げモーメントと荷重〔MB0〕

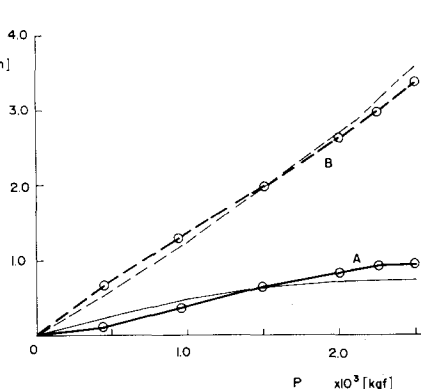


図-29 曲げモーメントと荷重〔MB1〕

を適用し、千鳥組曲げ試験で測定された継手回転角から求めている。また、◎部材中央部の曲げモーメントは、計算上生ずる作用曲げモーメントから継手部の曲げモーメントを差し引いた値である。これらの図から、継手部の曲げ剛性の小さい負曲げ試験の方が、◎部材の曲げモーメント分担率、すなわち、◎部材が負担する曲げモーメントと継手部に作用する曲げモーメントとの比が大きく、この傾向は、荷重レベルが大きくなるほど顕著になることがわかる。

(2) 解析モデル

図-31は、千鳥組曲げ試験に対する構造解析モデルを示したものである。図中の K_0 はセグメント継手をモデル化した回転バネを、 K_s はリング継手をモデル化したせん断バネを、それぞれ表している。また、セグメント本体部に相当するRC一般部は、曲げ剛性EIと軸剛性EAをもつばりにモデル化している。試験結果を破壊まで説明する目的で、回転バネとせん断バネはトリリニアールに考えた。また、はり部材も材料特性の非線形性を考慮している。

以下に、解析に用いたこれら各部材の諸定数を説明する。

a) 回転バネとせん断バネ

回転バネは、セグメント継手部曲げ試験〔MA0〕、〔MA1〕結果を参照し、図-32と表-2に示すようにモデル化した。また、せん断バネは、リング継手部せん断試験〔SY①〕、〔SX〕結果を参照し、図-33と表-3に示すようにモデル化した。

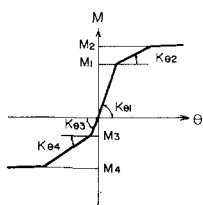


表-2 回転バネ定数

$K_{\theta 1} = 1.06 \times 10^7$	$M_1 = 1.8 \times 10^5$
$K_{\theta 2} = 3.4 \times 10^6$	$M_2 = 3.7 \times 10^5$
$-K_{\theta 3} = 6.5 \times 10^6$	$-M_3 = 1.3 \times 10^5$
$-K_{\theta 4} = 8.67 \times 10^5$	$-M_4 = 2.6 \times 10^5$
[kgf·cm/rad]	[kgf·cm]

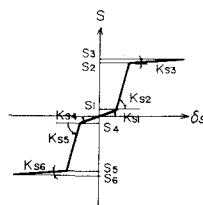


図-31 構造解析モデル

表-3 せん断バネ定数

$K_{S1} = 3 \times 10^4$ (4.3×10^4)	$S_1 = 2.0 \times 10^3$ (2.0×10^3)
$K_{S2} = 1.8 \times 10^4$ (2.5×10^4)	$S_2 = 9.0 \times 10^3$ (14.0×10^3)
$K_{S3} = 1.2 \times 10^3$ (9.2×10^3)	$S_3 = 2.0 \times 10^3$ (25.0×10^3)
$-K_{S4} = K_{S1}$	$-S_4 = S_1$
$-K_{S5} = K_{S2}$	$-S_5 = S_2$
$-K_{S6} = K_{S3}$	$-S_6 = S_3$
[kgf/cm]	[kgf]

図-32 回転バネ

図-33 せん断バネ (カッコ内は接線方向の値を示す)

ｂ) はり部材

まず、材料の非線形性に関して、コンクリートは図-34に示すように、放物線と直線からなる応力ひずみ関係を仮定し、鉄筋は図-35に示すように、バイリニアな応力ひずみ関係を仮定した。これら図中の各応力度とそれに対する各ひずみは、コンクリート材料試験(表-6)および文献(14)、図-34 コンクリートの応力ひずみ関係

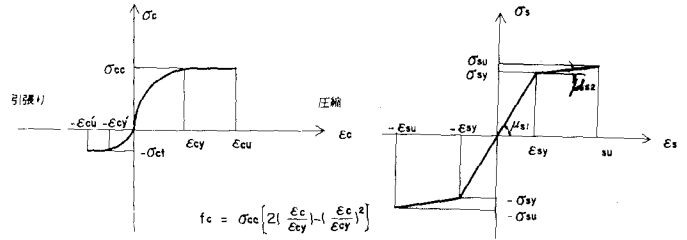


図-35 鉄筋の応力ひずみ関係 15), 16)などを参照して表-4, 5のように決定した。

表-4 各設定値(コンクリート)

$\sigma_{cc} = 420$ [kgf/cm ²]	$\sigma_{ct} = 30$ [kgf/cm ²]
$\epsilon_{cy} = 0.002$	$\epsilon_{cs} = 0.0002$
$\epsilon_{cu} = 0.0035$	$\epsilon_{csu} = 0.00035$

表-5 各設定値(鉄筋)

$\sigma_{sy} = 3600$ [kgf/cm ²]
$\epsilon_{sy} = 0.0018$
$\mu_{s1} = \frac{\sigma_{sy}}{\epsilon_{sy}} = 2.0 \times 10^6$ [kgf/cm ²]
$\mu_{s2} = \mu_{s1}/10$

次に、はり部材の軸剛性EA, 曲げ剛性EIは図-36, 37に示すように、それぞれ、軸ひずみ ϵ_N および曲率 φ に対応する割線勾配を用いた。なお、RC断面については、いわゆるひずみの平面保持則を前提とした(図-38参照)。一般にRC断面においては、中立軸における軸ひずみ $\epsilon_N = 0$ でも、見掛け上の軸力(N_0)が存在する(図-36参照)。また、配筋が中立軸に対して非対称な場合などで、応力状態によっては曲率 $\varphi = 0$ でも断面内に曲げモーメント(M_0)が存在する(図-37参照)。計算では、これらの軸力および曲げモーメントを初期応力として作用させる。なお、EA, EI, N_0 , M_0 の各値は、 ϵ_N , φ の値によって相互に連成して変化するので、計算は、ある荷重状態について繰り返し行ない、変形が収束するまで続け

表-6 コンクリート材料試験結果

		個数 n	平均値 $\bar{x}$	標準偏差値 $\sigma_{\bar{x}}$	
圧縮	強度 σ_{cc} [kgf/cm ²]	47	474.7	26.2	
	ひずみ ϵ_{cu} [10 ⁻³]	30	1973	216	
	弾性係数 E_c [kgf/cm ²]	30	4.29x10 ⁵	0.16x10 ⁵	
	ポアソン比 ν	30	0.233	0.0213	
引張り	強度 σ_{ct} [kgf/cm ²]	46	37.5	6.4	
	ひずみ ϵ_{csu} [10 ⁻³]	27	200	44	
	弾性係数 E_t [kgf/cm ²]	29	3.3x10 ⁵	0.89x10 ⁵	

引張り ;
割裂試験

表-7 コンクリートの示方配合

設計基準強度 [kgf/cm ²]	スランブ [cm]	空気量 [%]	W/C [%]	S/A [%]	セメント [kg/m ³]	水 [kg/m ³]	S [kg/m ³]	G [kg/m ³]
420	5.0~7.0	2.3±1.0	40	39	400	160	700	1140

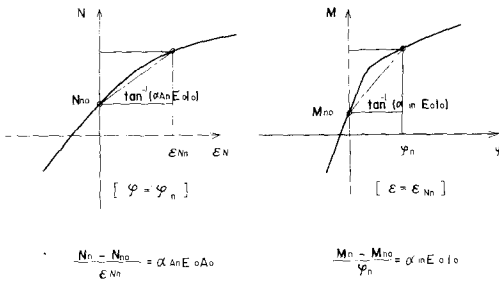


図-36 軸力と軸ひずみ

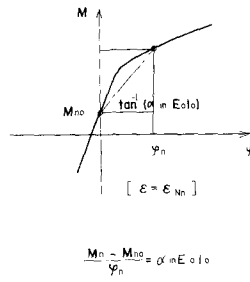


図-37 曲げモーメントと曲率

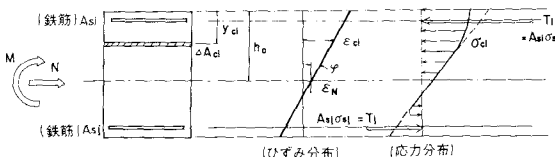


図-38 RC断面のモデル化

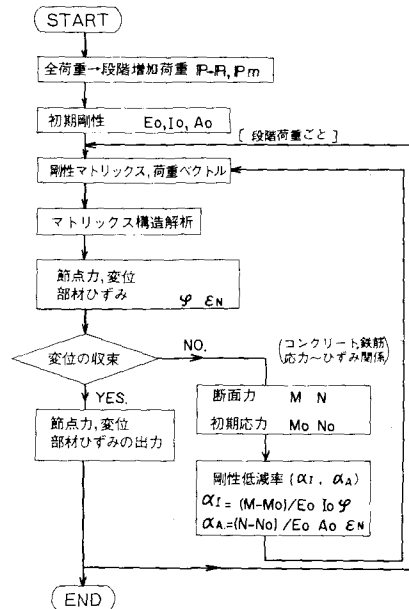


図-39 RCはり部材の解析フロー

17)
た。図-39は、これらの解析フローを示したものである。

(3) 試験結果と解析結果の比較

図-26～30は、以上に述べた解析モデルを用いて、試験結果と比較を行ったものであり、図中の細線が解析結果を示す。これらの図を見ると、解析値はよく試験値を説明しており、モデル化の妥当性が確認できた。

図-40は、構造解析モデルにおける各荷重レベルに対する各部材（回転バネ、せん断バネ、はり部材）の断面力発生状況を示したものである。回転バネにおいては、図-32の M_2 、 M_4 を、せん断バネにおいては、図-33の S_2 を、また、はり部材においては、はり部材だけの解析モデル上の曲げ耐力 My を、それぞれ破壊として設定すれば、明らかに、せん断バネが他の部材に比較して、早く破壊に向かって進行しつつあると考えられる。

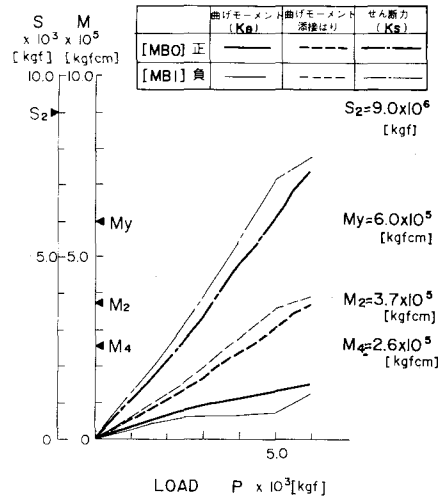


図-40 各部材の断面力と荷重(解析値)

6. 各試験の曲げ耐力比較

セグメント単体曲げ試験、セグメント継手部曲げ試験、千鳥組曲げ試験の各試験について比較検討してみた。まず始めに、セグメント単体曲げ試験の結果を図-41に示す。この試験に用いた供試体は、はり幅 1.0 m のもの [M0] と 0.5 m のもの [M00] との 2 種類であるが、図中の荷重 P は幅 1.0 m 当りに換算して示した。また、解析値は、5 (2) で示した解析モデルを用いて求めた値である。なお、供試体の配筋は、はり幅 1.0 m で、 $As=As'=7.92 \text{ cm}^2$ ($4 \times D18 + 4 \times D10$) である。

図-42は、各試験の曲げ耐力を比較してみたものである。これによれば、正曲げ試験、負曲げ試験ともに、千鳥組の曲げ耐力が、セグメント単体の曲げ耐力とセグメント継手部の曲げ耐力との和より下まわっているのがわかる。現状のセグメント継手部の曲げ剛性は、セグメント単体の曲げ剛性に比べ極端に小さく、ほとんどの変形がセグメント継手部のみに発生する。このためリング継手には、添接されたまっすぐなはりとの変形を拘束しようとして、比較的早く、大きな力が発生する。千鳥組曲げ試験の曲げ耐力が低いのは、セグメント単体とセグメント継手部が、それぞれの耐力を十分発揮する前に、リング継手が破壊してしまうためと考えられる。よって、千鳥組曲げ試験では、リング継手部の働きの、かなり支配的な役割を果たしている。

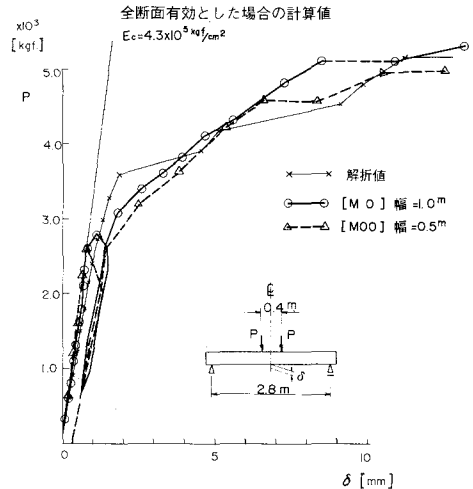
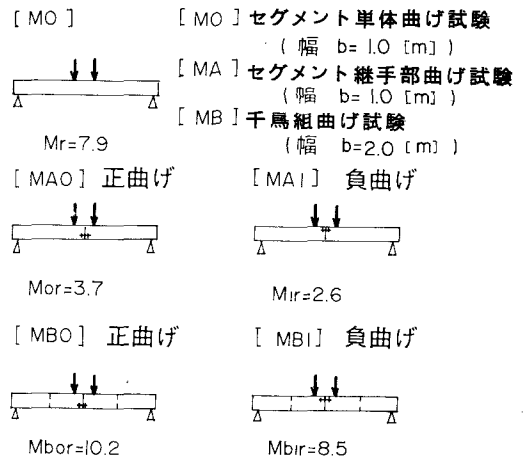


図-41 セグメント単体曲げ試験結果



単位 $\times 10^5$ [kgf.cm]

図-42 各試験の曲げ耐力比較

7. ま と め

以上の試験により、セグメントの各継手部挙動および千鳥組の構造解析モデルに関し、有益な結果が得られた。各試験について、その主たるものを列挙すれば、次のとおりである。

(1) セグメント継手部曲げ試験

① 軸力のない状態($N=0$)での曲げモーメントと、継手回転角との関係は、かなり低い荷重段階から非線形性を示し、この傾向は、負曲げの方が著しい。

② 現場におけるセグメントのように、かなり大きな軸力($N=50 \text{ tf}$)が作用する状況下では、曲げモーメントと継手回転角との関係が、正曲げ、負曲げとも、かなりの荷重段階まで直線的である。

③ 試験で得られた回転バネ定数は、 $K_\theta = 1.8 \times 10^7 \text{ kgf} \cdot \text{cm} / \text{rad}$ ($N=0$) $\sim 3.0 \times 10^7 \text{ kgf} \cdot \text{cm} / \text{rad}$ ($N=50 \text{ tf}$)で、オーダー的には、大きな差がない。なお、これを無次元化した継手部の曲げ剛性⁸⁾ $K_\theta^* = K_\theta \cdot r / EI$ (r :セグメントリング図心半径, EI :セグメント単体の曲げ剛性)で表記すれば、 $K_\theta^* = 0.13 \sim 0.22$ となる。

④ 継手部の曲げ剛性および耐力は、継手板の曲げ変形、コンクリートの支圧、アンカー筋の伸びなどに大きな影響を受ける。したがって、曲げ剛性や耐力を改善するためには、これらの補強が不可欠である。

(2) リング継手部せん断試験

[トンネル横断面の半径方向]

① 荷重の初期および最終段階では、継手板のずれ、コンクリートとの剥離などの原因で、かなり不規則な挙動をするが、主要部と考えた荷重段階では、作用せん断力とずれ変形量との関係が、ほぼ有線的である。

② この主要部における変形に大きな影響を与えるのは、アンカー筋であり、最終耐力に関してもアンカー筋の強度が、支配的である。なお、アンカー筋は図-6(b)に示したL状のものが、補強策として効果的である。

③ 試験で得られたせん断バネ定数は、主要部で、 $K_s = 1.8 \times 10^4 \text{ kgf} / \text{cm}$ である。

[トンネル横断面の接線方向]

① 半径方向のものに比べ、剛性、耐力とも大きく、そのせん断バネ定数は、 $K_s = 2.5 \times 10^4 \text{ kgf} / \text{cm}$ である。

(3) 千鳥組曲げ試験

① 千鳥組されたセグメントが曲げを受ける場合、リング継手の役割は大きく、今回の試験においては、耐力がリング継手の破壊により決まった。

② 添接はりの曲げモーメント分担率は、セグメント継手部の曲げ剛性の小さい負曲げの方が大きい。

③ 千鳥組したはりの構造解析モデルは、試験の結果をよく説明し、その妥当性が確認された。

一般にセグメントは、セグメント継手の存在による剛性および耐力の低下を補うために千鳥に組み立てられる。そしてこの千鳥組の添接効果により、リング継手にせん断力が発生し、相乗して堅固なトンネル覆工を形成している。したがって、セグメント本体およびセグメント継手部の強度を十分発揮させるための添接効果を期待するには、リング継手部の強度が重要なポイントとなり、セグメントを設計する上で、このことに十分注意を払わなければならないという事が、今回の試験において示された。

以上、セグメントの模型を用いた試験について、その結果を報告した。合理的なセグメントの設計を行う上で、まだ種々の問題があると考えられるので、著者らは現在、シールドトンネルにおけるセグメントの現場計測、セグメントリングの解析、トンネル縦断方向の解析(地震時、地盤沈下)なども行っており、これらの結果がまとまり次第報告できればと考えている。

最後に、この報告をまとめるにあたって、貴重なご意見をいただいた東洋大学 小泉淳博士、電力中央研究所土木研究所耐震構造部 岩楯敞広博士、同 担当研究員 当麻純一氏はじめ、関係各位に厚くお礼申し

あげる次第である。

参 考 文 献

- 1) 土木学会：トンネル標準示方書（シールド編），1977
- 2) 土木学会，下水道協会共編：シールド工事に用標準セグメント，1982
- 3) 日本鉄道施設協会：シールドトンネルの設計施工指針（案），1977
- 4) 山本，遠藤，福井：多ヒンデ系セグメントリングの設計計算法，土木学会論文集，第150号，1968.2
- 5) 山本，久保田：シールドトンネルにおけるセグメントリングの挙動について，第29回土木学会年次学術講演会概要集 III-182，1974
- 6) 久保，結城：シールドセグメントの応力に対する継手剛性の影響，土木学会論文集，第150号，1968.2
- 7) 結城：継手の剛性と組み方を考慮したシールドセグメントの解析，土木学会論文報告集，第176号，1970.4
- 8) 村上，小泉：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，1978.4
- 9) 村上，小泉：シールド工事に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，1980.4
- 10) 河田，植野，土井，宮崎，山本，長崎，沢：セグメントの継手剛性に関する実験とその考察(1)(2)(3)(4)，構造物設計資料，No.43，45，50，68
- 11) 長崎，土井，河田：新しい計算法を用いた直径13mのセグメントリングの設計，第35回土木学会年次学術講演会概要集 III-244，1980
- 12) 西野，藍田，三浦：セグメントリングの合理的な設計に関する解析検討，第39回土木学会年次学術講演会概要集 III-305，1984
- 13) 三浦，藍田，西野：セグメントリング千鳥組効果に関するモデル試験，第39回土木学会年次学術講演会概要集 III-304，1984
- 14) 岡村：コンクリート構造の限界状態設計法，共立出版^社，1978
- 15) 太田：構造物の非弾性解析，技報堂出版^社
- 16) 青木：鉄筋の強度と断面のばらつき，セメント・コンクリート No.384，1979.2
- 17) 児玉，瀧田，嶋田：地下連続壁の本体利用に関する実験その3（合成壁のモデル解析），第37回土木学会年次学術講演会概要集 V-187，1982