

シールドセグメント設計における継手の評価について

ESTIMATION OF ROTATIONAL FLEXURAL RIGIDITY OF SEGMENT JOINT
BASED ON LOADING TEST UNDER AXIAL FORCE

一戸 裕* 田中 正博*

Yutaka ICHINOHE and Masahiro TANAKA

The purpose of this paper is to investigate the behavior of the shield segment ring in surrounding ground based on the results of segment loading test and calculation.

The both fixed numbers, η and ζ , useful for designning our ring are closely connected with rotational flexural rigidity of segment joint.

This paper describes influence of axial force to rotational flexural rigidity based on segment loading test.

In order to construct the more rational and economical method for rings, it is very important to estimate appropriately the scale of axial force.

Keywords: segment joint, segment loading test, rotational flexural rigidity, axial force

1. はじめに

シールドトンネルを構成するセグメントリングは、継手の存在により、セグメント本体と同じ剛性を持つ剛性一様リングと比較して剛性が低い。従って、継手を含めたセグメントを合理的(経済的)に設計するためには、この剛性の低下を適切に評価すること、即ち地山中のセグメントリングの挙動を表現できる構造計算上のモデル化が重要な課題となる。

現行の設計法では、この構造計算モデルとして①剛性一様リングモデル($\eta \sim \zeta$ 法)と②梁バネモデルに大別されるが、セグメント(継手)の曲げ剛性や地山の土質により両者を適切に使い分けることで、多岐に亘るセグメントリングの合理的な設計が指向されている。

東京電力㈱千葉ガス導管建設所では、千葉港横断部の海底下に全長約 2.8kmのガス導管用シールド洞道を構築している。当工事用のセグメントを設計する際には、上記①のうち修正慣用法を採用し、リングとしての曲げ剛性の有効率 η を0.7、



※ 内は、修正慣用法によるセグメント設計フロー

図-1 η , ζ の評価フロー

* 正会員 東京電力㈱ 千葉ガス導管建設所 導管第二土木課

また添接効果によりリング継手を通して伝達される曲げモーメントの割増率 ζ を0.3として断面計算を行った。しかしこれら η および ζ は本来、設計されたセグメントの地山中におけるリングとしての挙動を示すものであるため、設計段階でこれらの定数をどのように決めるかが問題となる。そこで本論では図-1に示すフローに従い、当該地山における η および ζ の各値を検証する。

2. 修正慣用法によるセグメントの設計

表-1に示す地盤条件および荷重条件の下、 $\eta=0.7$ 、 $\zeta=0.3$ とした修正慣用法による断面計算を行った。その結果を表-2(a)、(b)に示す。表中の断面力は、全て単位幅当たりの値である。ただし、曲げモーメントMおよびせん断力Sについては最大値（せん断力Sは絶対値の最大値）を、また軸力Nについては、曲げモーメント最大の位置における軸力を示す。また、設計上考慮された主な条件は次の通りである。

ー材料ー

- ・コンクリート：設計基準強度 $f_{ck}=480\text{kgf/cm}^2$ 、
弾性係数 $E_c=3.2 \times 10^5\text{kgf/cm}^2$
- ・鉄筋：SD345

ーセグメント本体ー

- ・種別：RCセグメント
- ・外径： $D=3,950\text{mm}$
- ・幅： $B=1,200\text{mm}$
- ・鉄筋比は1%程度を最大限とする^{*)}。

ー継手ー

- ・通しボルト方式とする。
- ・セグメント間継手は、3本のボルトで構成し、セグメント本体の抵抗モーメントの60%以上を確保する^{*)}。
- ・リング間継手は、1リングに作用する鉛直荷重に対して全周に配置した16本のボルトの許容せん断応力度で抵抗するものとする。

当該セグメントリングの形状を図-2に示す。

3. セグメント継手曲げ試験

セグメントの設計結果からも分かるように、セグメントリングには、150tf程度の軸圧縮力が作用している。

表-1 地盤条件と荷重

項目	条件
G.L.	AP, m
シールド天端高	AP, m
土被り厚さ	m
土質	砂質土(濃)
平均N値	31
側圧算定法	土水分離
側方土圧係数	λ
地盤反力係数	k, kgf/cm ²
上載荷重	P_0
鉛直荷重	P_V
水平荷重	P_{H1}
	P_{H2}
地盤反力 ^{*)}	q
自重	g
自重反力	P_R
偏荷重比 ^{**)}	λ'

注*)：壁バネモデルの場合には、バネ反力として数値。

**)：偏荷重比とは、軸荷重に対する側方荷重の比を示す。 $[\lambda'=(\sum P_{H1}+\sum q)/(\sum P_V)]$

表-2(a) 断面力算定結果 (tf・m)

	M	(1+ ζ)M	(1- ζ)M	N(tf)	S(tf)
正	13.58	17.65	9.51	122.19	14.78
負	-12.20	-15.86	-8.54	155.73	

表-2(b) セグメント本体および継手の仕様 単位(kgf/cm²)

	セグメント本体				ピース間継手			リング間継手		
	As(cm ²) 鉄筋比 P	σ_c	σ_s	τ 接合部	鉄筋比 P	σ_c	σ_s	全荷重 W (tf)	鉄筋比 P	τ
正	D19×6 +D22×2	158	1530	11.1 D13×6	3-M27 (10.9)	114 (圧縮)		860340.14	16-M27 (10.9)	1855
負	=24.93 P=0.92	169	730	10225		105 (圧縮)				

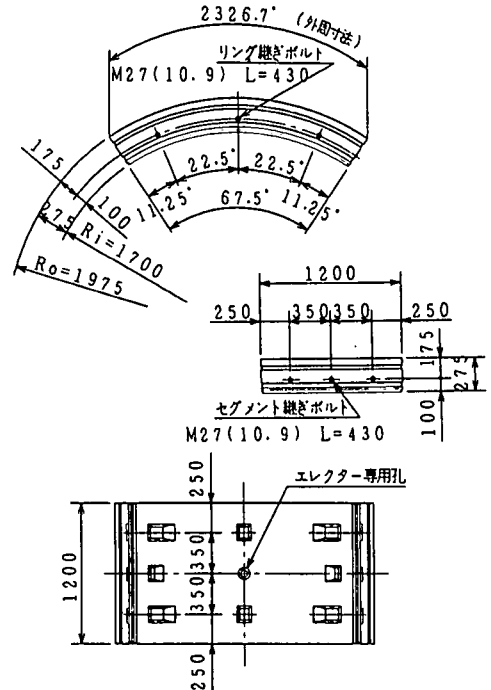


図-2 RCセグメント

実際のセグメント継手の曲げ（回転）挙動が、継手面に作用する軸力によりある程度拘束されることを考えると、軸力が継手剛性に与える影響を評価する必要がある。そこで、軸力の影響を把握するため、多段階の軸力導入下で当該セグメントの継手曲げ試験を実施した。継手の形状を図-3に示す。ここではこの継手の曲げ試験について報告するとともに、継手の力学的特性を把握することとする。

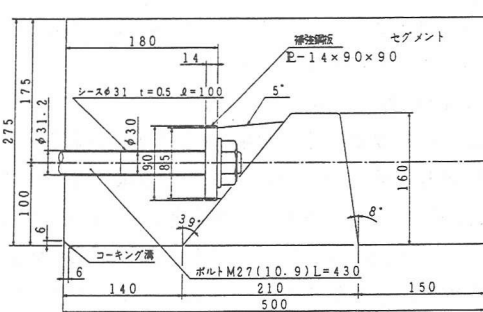


図-3 継手構造

3.1 試験供試体

継手曲げ試験で用いた供試体は、設計されたセグメントと材料および鉄筋比を等しくした曲率ゼロの平板型供試体で実物大である。

3.2 試験方法

試験は、まず写真-1および図-4に示すように、供試体を2枚継ぎ、それらを立てた状態で設置した。この際、ボルトには 2400kgf/cm^2 の圧縮応力（ボルトの許容応力度の80%の応力相当）が発生するようにボルトを締結した。その後、両端に設置した治具を2つのセンターホールジャッキで締め付けることにより軸力の導入を行った。導入する軸力については、コンクリートの応力度（全断面有効）で $0, 15, 30, 45\text{kgf/cm}^2$ に相当する軸力（順に $0, 50, 100, 150\text{tonf}$ ）の4段階としたが、繰り返し载荷による残留ひずみの影響を考慮して、軸力導入下の試験後には必ず軸力ゼロの試験を行い、再現性を確認した。曲げモーメントについては、所定の軸力を供試体に導入した後、2点载荷により作用させた。この際作用させる荷重は、設計レベルを考え、コンクリートまたはボルトの応力が許容応力度に達する時の荷重を最大とした。表-3に各軸力に対する载荷ステップおよび最大荷重を示す。なお実験中に生じるたわみに伴う载荷板間の摩擦対策として、载荷板間にはテフロン紙を挿入した。また継手面のシール材は貼らずに試験を行った。

3.3 試験結果および考察

(1) 曲げモーメントMについて

継手に作用する曲げモーメントMとしては、①2点载荷荷重によるものに加えて、②軸力とたわみ量により生じるものおよび③軸力と継手のシーシング溝深さにより生じるものが考えられるが、このうち②および

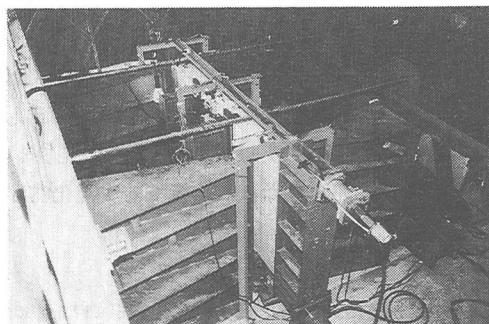


写真-1 継手曲げ試験状況

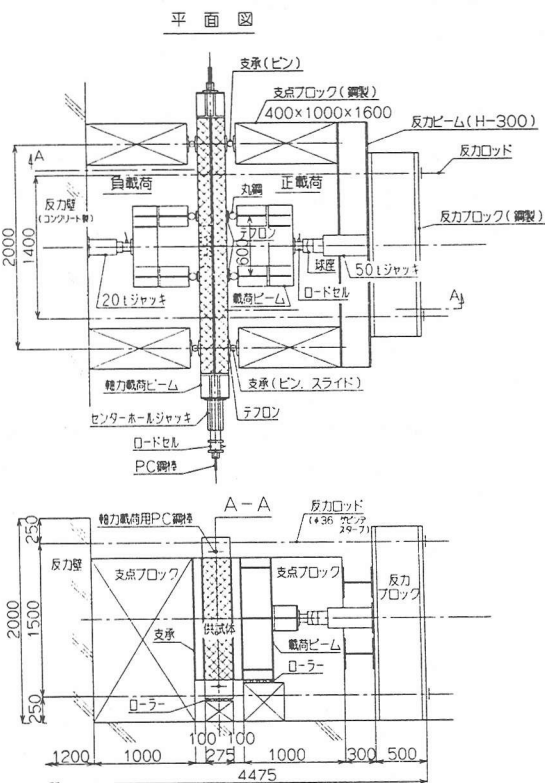


図-4 継手曲げ試験方法

③については①と比較して十分に小さいことが確認されたため、①のみを算定対象とした。

(2)継手の回転角 θ について

継手の回転角 θ は引張側目開き量(正)と圧縮側目開き量(負)より求めているが、単リングの試験供試体で、リング間の拘束がないため、目開き量は幅方向で変化する。この幅方向の分布は、正負とも図-5に示すように中央部で小さく端部で大きいことから、次式に従って幅方向の補正を行い、目開き量とした。

$$P=1/4 \cdot (P_2+2 \times P_3+P_4) \qquad \cdots \cdots \cdots \textcircled{1}$$

ここで、P:補正後目開き量(mm)

P2, P3, P4:図-5の各位置における目開き量(mm)

以上から継手の回転バネ定数 $k\theta$ (= M/θ)を算出し、図-6が得られた。図中の実線は、最小自乗法を用いて近似したものである。また次式に示す無次元化曲げ剛性 $k\theta^*$ を併記した。

$$k\theta^* = k\theta \cdot r/EI$$

ここで $k\theta$:セグメント継手の回転曲げ剛性(tf・m/rad)

r:リングの図心半径(=1.8375m)

EI:セグメント単体の曲げ剛性(tf・m²)

図-6より試設計セグメントの継手の力学的特性について以下のことが分かる。

- ①継手の回転バネ定数 $k\theta$ は、 $2 \times 10^{-4} \sim 3 \times 10^{-4}$ rad程度の回転角を境にバイリニア型の非線形性を示す。これは継手構造が通しボルトタイプであり、回転角 θ の小さい場合には、継手の曲げ剛性が継手あご部の押抜きせん断抵抗で決まり、大きい場合にはボルトの引張り抵抗で決まるためと考えられる。
- ②回転バネ定数 $k\theta$ は軸力Nにより変化し、Nが大きくなると $k\theta$ も大きくなる。
- ③正曲げと負曲げで $k\theta$ を比較すると、軸力ゼロの場合には、レバー比(175mm/100mm、図-2参照)に対応して正曲げの方が負曲げよりも大きい $k\theta$ を与えるが、軸力が作用する場合には同程度の $k\theta$ となっている。
- ④当該継手の無次元化曲げ剛性 $k\theta^*$ は、軸力N=0の場合、荷重としての曲げモーメントMが $M < 3 \text{tf} \cdot \text{m}$ で $k\theta^* = 2$ 程度、 $M \geq 3 \text{tf} \cdot \text{m}$ で $k\theta^* = 1$ 程度であり、一方N=150tfの場合には、 $M < 10 \text{tf} \cdot \text{m}$ で $k\theta^* = 17$ 程度、 $M \geq 10 \text{tf} \cdot \text{m}$ で $k\theta^* = 6$ 程度であると言える。

表-3 荷重ステップおよび最大荷重

荷重方向	軸力(tonf)	荷重ステップ(tonf)	最大荷重(tonf)
負曲げ	0	1.0	8.1
	50	2.0	19.0
	100	3.0	25.1
	150	3.0	28.0
正曲げ	0	2.0	18.1
	25	2.0	24.1
	50	3.0	33.2
	100	4.0	44.1
	150	5.0	48.2

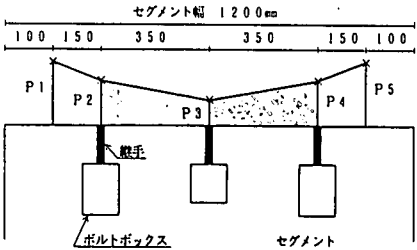


図-5 幅方向の目開き分布

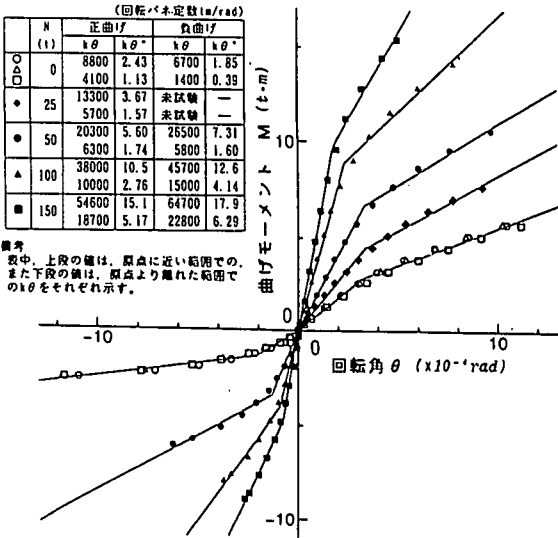


図-6 回転バネ定数 $k\theta$ (= M/θ)

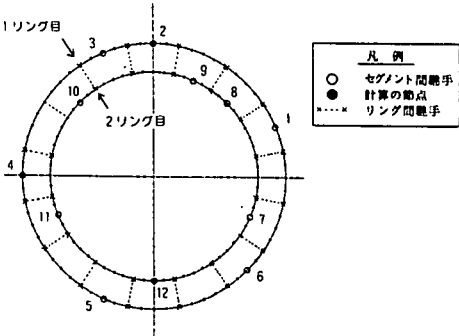


図-7 梁バネモデル

4. 梁バネモデル解析に基づく η 、 ζ の評価

4.1梁バネモデル

試験から求められた継手の力学的特性を図-7に示す2リング千鳥組みの梁バネモデルに組み込み、当該セグメントリングの挙動解析を試みた。表-4は、解析モデルに組み込んだ各物性値である。特にリング間のせん断バネ定数には、継手曲げ試験と同時期に実施された継手せん断試験の結果^{*2)}(図-8に示すせん断変形量によりバネ定数が変化するトリリニアモデル)を用いた。またセグメント間継手の回転バネは軸力の影響を受けるため、 k_{θ^*} をパラメータに複数の解析を行った。荷重条件については表-1に従い、セグメントリングの変形に伴う地盤反力については半径方向と接線方向で等価な地盤バネを設定し、変位が地盤側に生じる場合のみ地盤バネ反力として各節点に作用させた。

4.2解析結果に基づく η および ζ の評価

解析結果を表-5に示す。表中の M_{smax} 、 M_{jmax} 、 S_{max} は、リング全周の最大値を、 N_s 、 N_j はそれぞれ M_{smax} 、 M_{jmax} を与える要素の軸力を示す。また、リングとしての曲げ剛性の有効率 η および曲げモーメントの割増率 ζ は、以下の式より算出している^{*3)}。

$$\eta = \delta_{vo} / \delta_{vmax} \quad \dots \dots \textcircled{2}$$

ここで、 δ_{vo} : 剛性一様リング($k_{\theta^*}=\infty$)としたときの鉛直直径変化量(=2.58mm)

δ_{vmax} : 回転バネを持つリングとしたときの鉛直直径変化量(mm)

$$\zeta = (M_s - M_j) / (M_s + M_j) \quad \dots \dots \textcircled{3}$$

ここで、 M_s : 継手に隣接する本体部曲げモーメントの最大値(tf・m)

M_j : M_s を与える継手部曲げモーメント(tf・m)

表-5の η および ζ と k_{θ^*} との関係を図-9に取り上げる。

地山中のセグメントリングに $N=150$ tf程度の軸力が作用するときには、図-6の継手曲げ試験結果より、当該継手の k_{θ^*} は6程度と見なされる。このとき図-9より、(η 、 ζ)は(0.87、0.12)程度と求められる。即

表-4 解析条件

梁	断面積	: $A=0.33\text{m}^2$
要	断面2次モーメント	: $I=2.08\times10^{-3}\text{m}^4$
素	弾性係数	: $E=3.20\times10^6\text{tf/m}^2$
継手	セグメント間	回転バネ定数 無次元化曲げ剛性として $k_{\theta^*}=0\sim10, \infty$
	リング間*	半径方向せん断バネ定数 $k_{S1}=293, k_{S2}=0.07, k_{S3}=2.94$
		接線方向せん断バネ定数 $k_{S1}=166, k_{S2}=0.08, k_{S3}=4.31$

※) 参考文献2より、せん断試験においては、半径、接線方向とも荷重レベルにより3段階のせん断バネ定数を示す。(図-8)

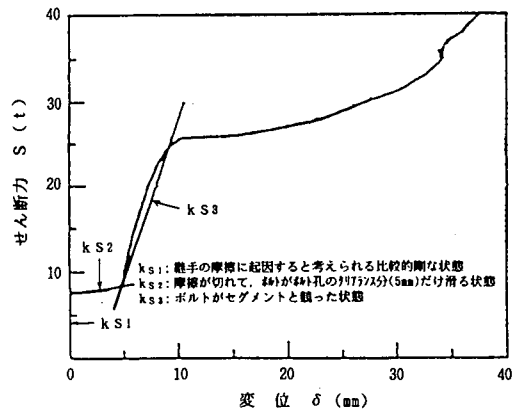


図-8 継手せん断試験結果 ($S \sim \delta$ 関係)

表-5 解析結果

継手曲げ剛性 k_{θ^*}	セグメント本体		セグメント継手		リング間 S_{max} (tf)	δ_{vmax} (mm)	η	ζ
	M_{smax} (tf・m)	N_s (tf)	M_{jmax} (tf・m)	N_j (tf)				
0	23.8	-14.2	0	240.0	20.6	6.23	0.41	1.00
0.1	23.0	20.8	1.9	209.6	16.3	5.33	0.48	0.82
0.2	22.2	40.8	3.1	211.4	13.7	5.09	0.51	0.72
0.4	21.0	62.6	4.9	200.5	10.5	4.57	0.56	0.59
0.7	19.7	78.8	6.7	184.9	8.0	4.13	0.62	0.47
1.0	18.8	87.7	7.9	174.6	6.4	3.86	0.67	0.40
2.0	17.0	100.9	10.0	156.5	4.0	3.41	0.76	0.26
4.0	15.8	109.7	11.5	143.4	2.3	3.08	0.84	0.16
7.0	15.0	114.2	12.2	136.6	1.4	2.89	0.89	0.10
10.0	14.7	116.2	12.6	127.5	1.0	2.81	0.92	0.07
∞	14.0	121.1	14.0	121.1	0.5	2.58	1.00	0

ち、当該セグメントの挙動は、軸力を考慮した場合には剛性一様リングの挙動に近いと考えられる。

同様に軸力ゼロの場合には、 $k\theta^*$ は1程度で (η, ζ) は $(0.67, 0.40)$ 程度となることから、 η および ζ の各値は、セグメント継手に作用する軸力の大きさに大きく左右されると言える。なお、設計時に設定した $(\eta, \zeta) = (0.7, 0.3)$ は、軸力ゼロ（考慮しない）の場合に近いことがわかる。

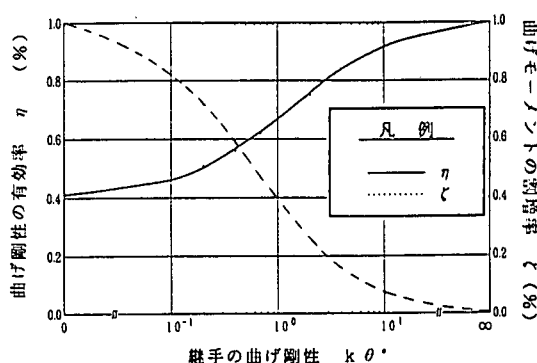


図-9 $k\theta^*$ と η および ζ の関係

(1) 通しボルト方式の継手を対象とした継手曲げ試験の結果、地山相当の軸力を導入した場合には、軸力を導入しない場合に比べ、継手曲げ剛性 $k\theta^*$ は1オーダー高い値を示すことが分かった。今後は、地山の特性をより正確に把握し、軸力を適切に見積もることが重要な課題である。また継手方式、セグメント寸法および作用軸力の相互の関連性を見いだすために、継手試験データを蓄積していきたい。

(2) 梁バネ計算結果の η および ζ と修正慣用法の入力値のそれらとは多少意味合いが違うが、当工事用のセグメントリングは、地山中において剛性EIなる剛性一様リングに近い挙動を示すことが分かった。

6. 参考文献

- 1) 土木学会・日本下水道協会：シールド工事中標準セグメント，1990.4
- 2) 佐々木協一・坂間茂・金子雄一・新俣弘：セグメント継手のせん断挙動に関する実験的検討，第48回土木学会年次学術講演会，1993.9
- 3) 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，1978.4