

任意の継手構造を有する合成セグメントのセグメント継手回転ばね定数の評価に関する考察

パシフィックコンサルタンツ株式会社 正会員 鈴木和広
株式会社横河NSエンジニアリング 松村 卓
株式会社横河NSエンジニアリング 正会員 ○山下雄一
株式会社横河NSエンジニアリング 正会員 岡本翔太

1. はじめに

六面鋼殻合成セグメントの特長のひとつは、セグメント継手やリング継手に必要とされる条件に応じて、様々な継手を適用できることである。近年では施工の省力化を目的としたボルトレス継手を用いることが多く、既に六面鋼殻合成セグメントとこれを組み合わせた事例もある。

昨年に改訂された「鉄道構造物等設計標準・同解説 トンネル・シールド編」¹⁾では、シールドトンネルの設計に性能照査型設計法が導入されており、継手降伏以降の破壊に至るまでの大変形領域での部材照査を行う場合には、継手の破壊形態や挙動を把握することが重要と考える。

本稿では、セグメント継手にボルトレス継手を用いた六面鋼殻合成セグメントの継手曲げ実験から得られた知見を基に、大変形領域におけるセグメント継手の合理的なモデル化による回転ばね定数と、セグメント継手における終局限界状態の評価について提案する。

2. 六面鋼殻合成セグメントのセグメント継手の回転挙動について

六面鋼殻合成セグメントのセグメント継手の回転挙動は、図-1に示すように継手板の端辺を回転中心とした挙動と考えられ、断面力(曲げモーメント M と軸力 N)と継手引張力 T との釣り合いから回転角 θ が定まる。継手が破断に至るまでの過程は、以下に示す4つの領域に分けられる。

領域I	継手が離間する曲げモーメント M_c 以下の領域
領域II	継手の離間後、内縁側継手と外縁側継手の両方が降伏荷重以下となっている領域
領域III	内縁側継手は降伏荷重を超えているが、外縁側継手は降伏荷重を超えていない領域
領域IV	内縁側継手と外縁側継手の両方が降伏荷重を超え、内縁側継手が破断に至る領域

実験結果として、図-2に曲げモーメントー回転角(M - θ)関係を、表-1に算出した $M \cdot \theta$ ・回転ばね定数 k_m を示す。

図-2に示すように、今回の継手曲げ実験では軸力 N を導入していないため、II～IVの領域が勾配として現れている。また、内縁側継手と外縁側継手が降伏に達する回転角 θ_{y1} , θ_{y2} 付近で、勾配が変化していることが確認できる。

ここで、 θ_{y1} , θ_{y2} は、それぞれの継手の位置における変位が継手諸元(降伏荷重および引張ばね定数)から算出される降伏伸び量となる回転角である。

加えて、領域IIにおける勾配は、継手諸元から計算される回転ばね定数とほぼ一致していることも確認できる。

キーワード：合成セグメント、セグメント継手、性能照査型設計、回転ばね定数、終局限界状態

連絡先 〒108-0023 東京都港区芝浦 4-4-44 横河ビル 6F TEL 03-3457-2708

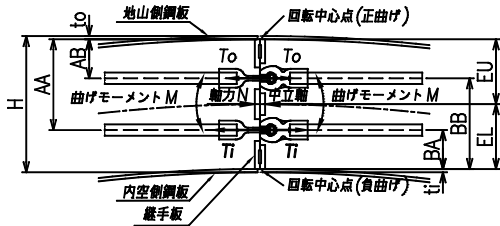


図-1 セグメント継手の回転挙動

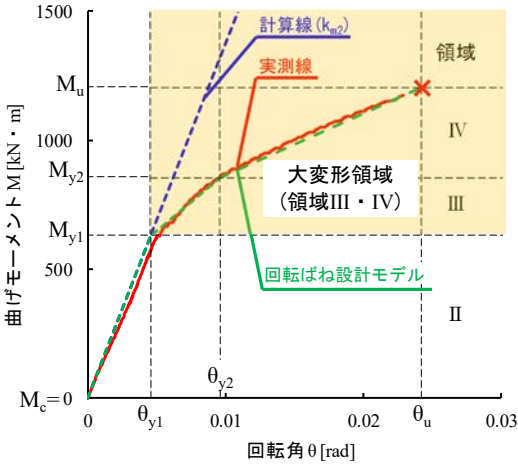


図-2 実験結果 (M - θ 関係)

表-1 実験結果 ($M \cdot \theta$ ・km)

領域	M kN・m	θ rad	k_m kN・m/rad
II	633	0.00513	123,392
III	859	0.00960	50,559
IV	1,207	0.02418	23,868

3. 継手降伏以降の回転ばね設計モデルと終局状態の判定について

継手降伏以降の回転挙動をモデル化する方法（図-2に示される緑色の点線）として、継手降伏後の引張ばね定数を、継手降伏前の引張ばね定数との比 β （図-3(a)）より表すことで算出できる、回転ばね設計モデル（図-3(b)）を提案する。

$$\beta = \text{降伏後の引張ばね定数} / \text{降伏前の引張ばね定数} k_j$$

以下に、 β の決定と回転ばねのモデル作成の手順を記す。

- ① 継手降伏前の引張ばね定数 k_j と継手の降伏引張力 T_y は、使用した継手諸元（表-3）を用いる。また、 k_j と T_y から継手に降伏荷重が生じる時の伸び量 δ_y を求める。
- ② 継手は継手板の端辺を中心に回転するものとして、内縁側継手と外縁側継手が降伏する伸び量 δ_y に達する回転角 θ_{y1} と θ_{y2} を各々求める。
- ③ 内縁側継手が降伏に至るモーメント M_{y1} は、継手諸元により、下式より求める。

$$M_{y1} = T_i (= T_y) \times (AA^2 + AB^2) / AA + N \times E_U$$

- ④ 継手降伏前の回転ばね定数 k_{m2} は、過程モデル（表-2）により求める。

$$k_{m2} = (M_{y1} - M_c) / \theta_{y1} = k_j \times (AA^2 + AB^2)$$

- ⑤ 領域III、IVにおける回転ばね定数 k_{m3} 、 k_{m4} も、過程モデルにより求める。

$$k_{m3} = (M_{y2} - M_{y1}) / (\theta_{y2} - \theta_{y1}) = (\beta AA^2 + AB^2) \times k_j$$

$$k_{m4} = (M_u - M_{y2}) / (\theta_u - \theta_{y2}) = \beta \times (AA^2 + AB^2) \times k_j$$

- ⑥ θ'_{y1} 、 θ'_{y2} における曲げモーメント M'_{y2} 、 M'_u より、これらを直線で結んだ線の勾配 k'_{m3} 、 k'_{m4} を算出し、上記の回転ばねモデルとの関係から β を決定する。
- ⑦ 今回の実験により得られた β は、0.174 である。

この回転ばねモデルを用いて解析を行うことで、例えば L2 レベルでの耐震検討において、セグメント継手の大変形領域を考慮した合理的な設計が可能となる。

次に、セグメント継手の終局限界状態は、今回の実験結果より継手の伸び量 δ が、破断時の伸び量 δ_u に達する時の回転角 θ_u で評価することを提案する。つまり、継手の終局限界状態は、回転角 $\theta_u=0.02418(\text{rad})$ の伸び量 $\delta_u=7.91 (= \theta_u \times AA)$ (mm) となる。

4. 解析事例

解析事例として、表-4 に大変形領域を考慮した場合（回転ばね設計モデル）と考慮しない場合（計算線 (k_{m2})）の計算結果を示す。本体部と継手部の曲げモーメント（正曲げ最大 $M_{\max}$ と負曲げ最大 $M_{\min}$ ）を比較すると、回転ばね設計モデルを用いることで、本体部は 4% 程度の増加となり、継手部は 20% 程度の低減となる結果であった。

5. おわりに

今回に実施した継手曲げ実験で得られた知見により、継手降伏以降の大変形領域におけるセグメント継手の回転ばね定数の評価手法として、継手降伏前後の引張ばね定数の比である β を用いた回転ばね設計モデルを提案した。また、セグメント継手の終局限界状態は破断時の伸び量 δ_u に達する時の回転角 θ_u で評価することを提案した。上記の提案は、地震時など的大変形を伴う荷重作用下に対して、セグメントの設計に有益であると考える。

本稿における提案におきまして、御指導いただきました早稲田大学小泉淳名誉教授に心より感謝を申し上げます。

参考文献

1) 国土交通省鉄道局監修・鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説-トンネル・シールド編，2022. 5

2) 日本シールドセグメント技術協会・RCセグメント部会：コーンコネクターセグメント，http://www.jssa3.org/tech/corn_pf_210316.pdf

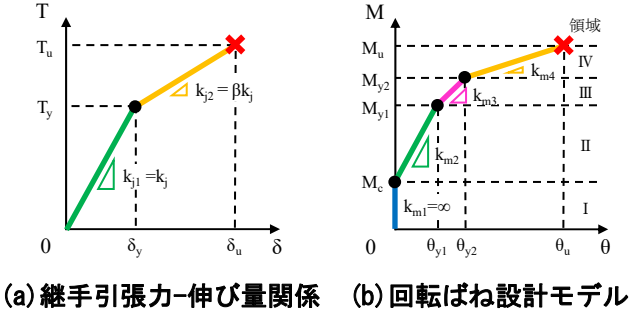


図-3 継手降伏以降の設定条件

表-2 継手が離間から破壊へ至るまでの過程モデル

領域	I	II	III	IV
M	$M \leq M_c$	$M_c < M \leq M_{y1}$	$M_{y1} < M \leq M_{y2}$	$M_{y2} < M \leq M_u$
T_i	0	$0 < T_i \leq T_y$	$T_y < T_i$	$T_y < T_i$
T_o		$0 < T_o \leq T_y$	$T_o \leq T_y$	$T_y < T_o$
θ	0	$0 < \theta \leq \theta_{y1}$	$\theta_{y1} < \theta \leq \theta_{y2}$	$\theta_{y2} < \theta \leq \theta_u$
k_m	$k_{m1} = \infty$	k_{m2}	k_{m3}	k_{m4}

表-3 回転ばね設定条件例

継手配置条件	H	500	mm(セグメント高)
	t_o	8	mm(地山側鋼板)
	t_i	8	mm(内空側 ")
	E_U	242	mm($(H-t_o-t_i)/2$)
	E_L	242	mm($(H-t_o-t_i)/2$)
	AA	327	mm(内縁継手位置)
	AB	157	mm(外縁 ")
	BA	157	mm(内縁 ")
継手諸元	BB	327	mm(外縁 ")
	型式	D38	コーンコネクター ²⁾
	k_j	1,044	kN/mm
	T_y	1,573	kN(継手部あたり)
	δ_y	1.507	mm($=T_y/k_j$)

表-4 解析事例

数値：M (kN・m)		大変形領域を考慮	
		しない	する
本体部	$M_{\max}$	3560.9	3700.7
	$M_{\min}$	-3590.8	-3744.8
継手部	$M_{\max}$	2390.6	1887.3
	$M_{\min}$	-2381.6	-1862.7