

(9) 汎用シールドセグメント解析システムとその適用例

SYSTEM FOR SHIELD SEGMENT ANALYSIS
AND STUDIES ON THE ANALYSIS OF SHIELD TUNNEL

榎島幸博* 山本忠典*

大田 弘**

宮下芳高*** 木戸義和****

Recently, a shield tunnel of which diameter is very large has been planned or constructed in so deep position underground. Shield segments of the tunnel under such as difficult conditions should be designed even more rationally and efficiently in order to assure reliability on the structure and reduce the cost of the construction. In general, it is difficult for the common design methods to expect the exact behavior of the segment rings because of no evaluation of the joints. The system for shield segment analysis "SIGMA" we developed is useful and necessary program for rational design of shield segment rings. This paper deals with the outline and the result of "SIGMA".

KEY WORD : Development of system, Shield segment, Rational design

1. まえがき

最近のシールド工法の大きな課題の一つとして、「大深度化」、「大口径化」などに対応できる「セグメントの合理的な設計法の確立」があげられる。すなわち、地下空間に求められる安全性を保証する一方で、工事費の約30～40%を占めるセグメント覆工費の経済性の追求のための「合理的な設計」が望まれている。

そこで筆者らは、今までのセグメントに関する研究・開発のノウハウをもとに、合理的なセグメントの設計・解析を行うための実用性に富んだ「汎用シールドセグメント解析システム (SIGMA)」を開発したので、その概要および適用事例などについて報告する。

2. システムの概要

本システムは、シールドセグメントの解析に際し、種々のセグメント形状・構造および解析条件などに合理的に対応できると同時に、入力データ作成の繁雑さを解消した、極めて利便性・有用性の高いシステムである。

* 銆熊谷組 電算室第2部

** 同 土木本部土木設計部

*** 同 技術研究所豊川技術部

**** 同 技術研究所トンネル技術開発部

2. 1 システムの構成および運用法

システムは、セグメント本体およびセグメント継手、リング継手に発生する応力・変形を算定する解析プログラム（SIGMA/SOLV）と解析プログラムの節点座標、要素構成などの構造データを自動生成するプリプロセッサ（SIGMA/PRE）、そして構造図・断面力図・変位図などを作図するポストプロセッサ（SIGMA/POST）から構成されている。また、その運用法は図-1に示す通りである。

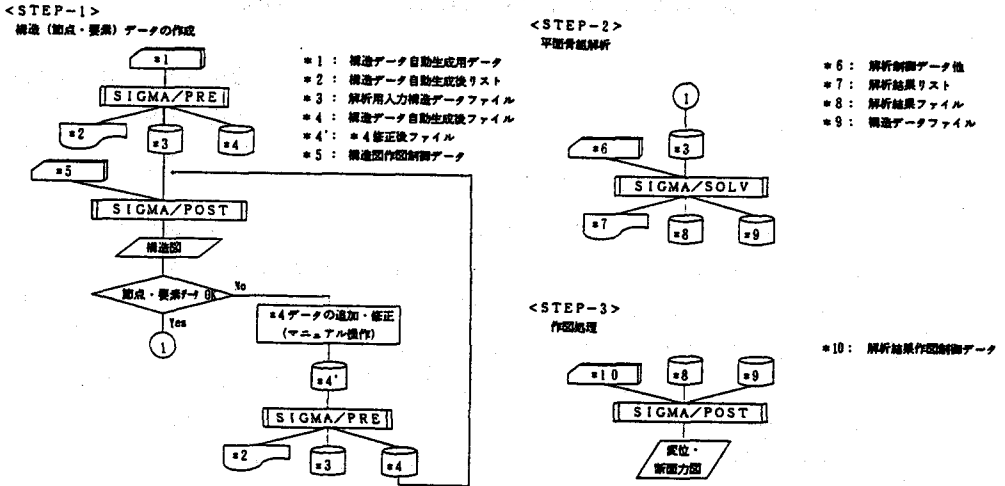


図-1 システム運用法

2. 2 解析の基本モデル

解析の基本モデルは、図-2に示す通り、セグメント主部材を多角形のはり部材に、セグメント継手を回転バネに、リング継手を接線方向と法線方向のせん断バネに、そして地盤反力を、分布バネ、集中バネにおきかえた、2次元骨組構造である。

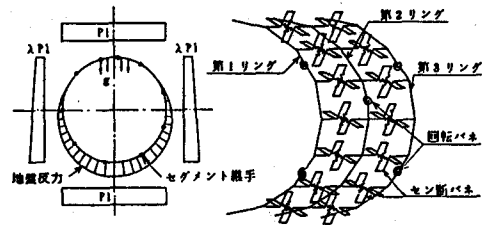


図-2 解析骨組モデル

2. 3 システムの特徴

- (1) 提案されている各種設計法に対応でき、任意のトンネル形状、セグメント構造および千鳥組（2方、3方千鳥）効果が考慮できる。
- (2) 載荷荷重、部材の追加・削除などの構造の変化に応じたステップ解析が可能で、施工（実験）過程を解析的にシミュレートすることができる。
- (3) セグメント継手、リング継手のバネ剛性について、種々の非線形特性を扱うことができる。また、セグメント継手については、軸力を考慮した非線形のバネも扱うことができる。
- (4) 地盤反力のモデル化には、集中バネの他、材軸方向、材直角方向の分布バネを扱うことができる。また、そのノータンション解析も行うことができる。
- (5) 利用者にとって、複雑な作業となる入力データの作成、特に構造データの作成を極力簡略化し、複雑な2連トンネルなどの場合でも、わずか数行の入力データで、それらの自動生成を行うことができる。

3. システムの適用分野

本システムは、下記のような解析に適用できる。

- (1) 作用荷重、構造の変化など施工段階を考慮した解析
- (2) 各種載荷試験結果の解析
- (3) 現場計測結果の解析

なお、本システムには、種々の解析機能が組み込まれており、シールドセグメント解析だけでなく、一般構造物の設計・解析にも適用することができる。

4. 適用例

3連複合円シールドについて、セグメント継手の回転剛性をケース1は低い継手、ケース2では、高い継手として2ケースの解析を行い、本プログラムの有用性を確かめる。

4. 1 構造条件

- (1) トンネル断面形状

幅16m、高さ7mの3連複合円シールド
(図-3)を2方千鳥で解析を行う。

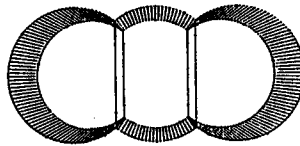


図-3 解析モデル

- (2) セグメント部材の断面性能

セグメント部材の断面性能を、表-1に示す。

- (3) セグメント継手の性能

セグメント継手は、部材端に付く回転バネとし、そのバネはTri-linearの非線形とする。(表-2、図-4参照)

- (4) リング継手の性能

リング継手は、節点間のせん断バネとし、そのバネはBi-linearの非線形とする。(表-3、図-5参照)

表-1 部材の断面性能

部材	ヤング率(tf/m^2)	断面2次モーメント(m^4)	断面積(m^2)
セグメント本体	3.666	$1.8\text{E}-3$ 、 $1.386\text{E}-3$	0.35、0.55
中柱(G1)	2.167	$1.08\text{E}-4$	0.009218
中柱(G2)	2.167	$1.08\text{E}-4$	0.03033

表-2 セグメント継手の性能

CASE	ϕ_1	ϕ_2	ϕ_3	ϕ_4	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6
1	-3E-3	-6E-4	6E-4	3E-3	500	1000	2000	4000	2000	1000
2	-1E-3	-3E-4	3E-4	1E-3	2250	3750	11000	22000	7500	4500

ϕ_i : バネ定数変化点 (回転角ラジアン)、 k_i : バネ定数 (tf/m/rad)

表-3 リング継手の性能

CASE	δ_1	δ_2	k_1	k_2	k_3	k_4
1	-3E-5	3E-5	1.5E5	1.5E6	1.5E6	1.5E5
2	-3E-5	3E-5	1.5E5	1.5E6	1.5E6	1.5E5

δ_i : バネ定数変化点 (節点相対変位 m)、 k_i : バネ定数 (tf/m)

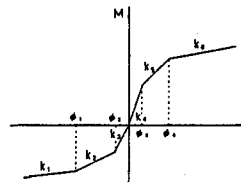


図-4 回転バネ定数(Tri-linear)

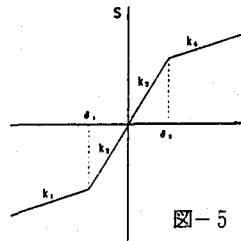


図-5 せん断バネ定数(Bi-linear)

4. 2 地盤反力の取り扱い

地盤反力は、半径方向の集中バネでモデル化する。なお、地盤反力を受けないバネは、プログラム内部で自動的に取りはずす。(ノーテンション解析)

4. 3 ステップ解析

ステップ解析の特徴は、施工過程に合わせた荷重条件の変化、構造の変化に対応して解析できることである。

(1) ステップ1

- a. 荷重条件
自重+自重反力
- b. 構造条件
横3連複合円，仮設中柱（柱剛性：G1）

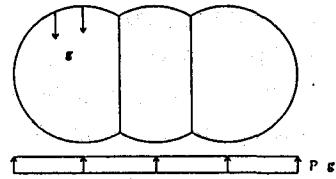


図-6 ステップ1 荷重図

(2) ステップ2

- a. 荷重条件
 - (i) 外荷重
 - (ii) ステップ1の結果と(i)の足し合わせ
- b. 構造条件
横3連複合円，仮設中柱（柱剛性：G1）

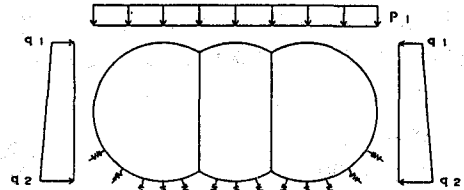


図-7 ステップ2 荷重図

(3) ステップ3

- a. 荷重条件
仮設中柱を本設中柱に盛り替えのための解放節点力
- b. 構造条件
横3連複合円，本設中柱（柱剛性：G2）

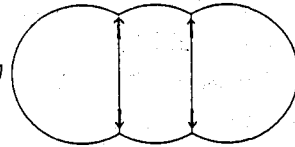


図-8 ステップ3 荷重図

4. 4 解析結果および考察

ケース1とケース2のステップ3における解析結果を、表-4に示す。

表-4 解析結果（モーメント，リング間せん断力図）

		CASE 1	CASE 2
曲 げ モ ー メ ン ト	リング 1		
	リング 2		
リング 間 継 手 の せん 断 力			

(1)発生曲げモーメントについて

ケース1、ケース2のステップ3における、解析結果の発生最大曲げモーメントについて比較したものを表-5に示す。一方、千鳥組されたセグメントにおける隣接セグメントとのモーメントの伝達については、図-9に示す流れとなる。

表-5 発生最大曲げモーメント

			曲げモーメント (tfm)
CASE1	正の曲げ モーメント	本体	20.51
		継手部	3.25
	負の曲げ モーメント	本体	-15.58
		継手部	-1.44
CASE2	正の曲げ モーメント	本体	16.39
		継手部	7.89
	負の曲げ モーメント	本体	-13.53
		継手部	-4.15

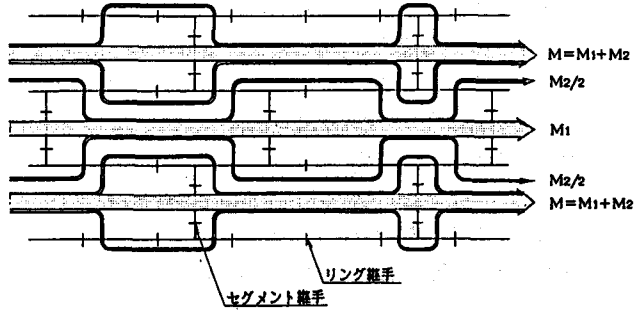


図-9 千鳥組におけるモーメントの流れ

図-9におけるMは、セグメントの1リングあたりに作用する曲げモーメントである。このMは、セグメント継手で伝達される曲げモーメント M_1 と隣接セグメントに作用する曲げモーメント M_2 に分割される。したがって、

$$M = M_1 + M_2 \quad (4.1)$$

また、セグメントの本体に作用する曲げモーメント M_H は、隣接セグメントの継手付近より流れてくるモーメント M_2 が加わるので、

$$\begin{aligned} M_H &= M + M_2 \quad (4.2) \\ &= M * (1 + M_2 / M) \\ &= M * (1 + \zeta) \end{aligned} \quad \text{ここで、} \zeta : \text{曲げモーメントの割増率}$$

となる。この式において、 M_2 が小さければ小さい程 M_H は小さくなる。 M_2 が小さくなる場合とは、即ち(4.1)式の関係から M_1 が相対的に大きくなる事である。これは、セグメント継手で伝達する曲げモーメントが大きくなることである。次にステップ3の解析結果より、曲げモーメントの割増率 ζ を求める。

(i) CASE1 正の曲げモーメント最大点

$$M(1 + \zeta) = 20.51 \text{ (tfm)}$$

$$M(1 - \zeta) = 3.25 \text{ (tfm)}$$

$$\text{この2式より、} \zeta = 0.726$$

(ii) CASE1 負の曲げモーメント最大点

$$M(1 + \zeta) = -15.58 \text{ (tfm)}$$

$$M(1 - \zeta) = -1.44 \text{ (tfm)}$$

$$\text{この2式より、} \zeta = 0.831$$

(iii) CASE2 正の曲げモーメント最大点

$$M(1 + \zeta) = 16.39 \text{ (tfm)}$$

$$M(1 - \zeta) = 7.89 \text{ (tfm)}$$

$$\text{この2式より、} \zeta = 0.350$$

(iv) CASE2 負の曲げモーメント最大点

$$M(1 + \zeta) = -13.53 \text{ (tfm)}$$

$$M(1 - \zeta) = -4.15 \text{ (tfm)}$$

$$\text{この2式より、} \zeta = 0.531$$

本適用例では、2種類のセグメント継手について、セグメント継手性能を与えて千鳥組を考慮した解析を行った。その結果、ケース2がケース1に比べ、隣接セグメントへの割増率が小さく、セグメント本体に作用する曲げモーメントは小さくなっている。これはセグメントの継手性能の違いが、セグメント本体に作用する曲げモーメントに対して、大きく影響を及ぼす事を示している。また、セグメント継手に作用する曲げモーメントは、両ケースとも本体に比べてかなり小さくなっており、これは継手固有の値である。

従来の慣用計算法では、シールドセグメントのセグメント継手について、セグメント継手をモデル化せず、継手のない剛性一様部材としての扱いであったため、継手に発生する断面力を把握することができなかった。そのためシールドセグメントのセグメント継手の設計については、経験的に定められた本体の曲げ抵抗に対するある割合を与えて設計されている実状にあった。ところが本システムによれば、千鳥組構造モデルがそのまま扱え、セグメント継手の挙動も含めて解析できるのでセグメント継手の合理的な設計が可能となる。

(2) リング間継手のせん断力について

ステップ3の計算結果でリング間継手に作用する最大せん断力は、ケース1の場合 $S_{R,1} = 49.55$ tf、ケース2の場合 $S_{R,2} = 30.09$ tf である。リング間継手のせん断バネ定数については、ケース1およびケース2とも同じ値を用いている。この結果の違いはケース1はケース2に比較してセグメント継手での曲げモーメントの伝達が少なく、その代わり隣接セグメントへの曲げモーメントの伝達が大きくなる。そのため、リング間継手にはより多くのせん断力が発生する。

従来の慣用計算法では、シールドセグメントのリング間継手については解析上考慮されていなかった。そのため、シールドセグメントの千鳥組におけるリング間の継手の設計については経験的なもので決定されている実状にあった。ところが、本システムによれば、千鳥組構造モデルがそのまま解析できるので、リング間継手の合理的な設計が可能となる。

5. まとめ

本システムは、シールドセグメントの挙動を実際に近いシミュレートを行って解析することができるため、従来提案されている各種設計法はもとより、セグメントの継手の挙動、地盤反力等を含めて解析できる。

4章で示した本システムの適用例によれば、従来、設計に用いられてきた慣用計算法では解明されなかった継手の部分の解析も可能となり、セグメントの合理的設計への道を開くものと考えられる。更に、本システムは種々のシールドセグメントの構造および解析条件に対応できるように考慮されている。そのため、本システムは今後のシールドセグメントの解析において、極めて有用性が高いといえる。

参考文献

- 1) 村上・小泉：シールド工事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 NO.296 1980
- 2) 半谷：二次覆工を有するシールドトンネル覆工の力学的特性に関する研究
鉄道技術研究報告 NO.1303 1985
- 3) 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 NO.272 1978