

シールド工事用セグメントへの 信頼性設計適用に関する試算

齋藤 良一¹・岩波 基²

¹学生会員 長岡工業高等専門学校 専攻科 環境都市工学専攻 (〒940-8532 新潟県長岡市西片貝町888番地)

E-mail: ac228301@st.nagaoka-ct.ac.jp

²正会員 長岡工業高等専門学校 環境都市工学科 教授 (〒940-8532 新潟県長岡市西片貝町888番地)

E-mail: miwanami@nagaoka-ct.ac.jp

我が国で長年シールド工事用セグメントの設計に用いられてきた許容応力度設計法は多数の実績があり、かつ比較的簡便ながら信頼性が高い設計方法である。しかし、許容応力度設計法による照査は力学的な構造安定性能の照査にとどまっており、限界状態設計法における部分安全係数もデータに基づいて合理的に定められたものとは言い難い現状にある。本報告は、シールドトンネルの構造解析において解析に用いる定数のばらつきが解析結果へ与える影響について把握するために、現行の設計基準に基づいて設定した鉄道用シールドトンネルの構造解析において、セグメント継手の回転ばね定数と地盤の側方土圧係数および地盤反力係数のばらつきを考慮して解析を行った結果を示したものである。

Key Words : shield tunnel , reliability design , segment joint

1. はじめに

我が国では、WTOにおいて1995年に調印した「政府調達協定」および「貿易の技術的障害に関する協定 (TBT協定)」の発効により、国際標準化機構 (ISO) において設定された規格 (ISO規格) の遵守が求められるようになった。土木構造物の設計の分野では、ISO2394「構造物の信頼性に関する一般原則」が発行され、我が国においても国内の規格とISO2394との適合性を確保する必要に迫られている。ISO2394とは土木構造物の設計において限界状態に対する信頼性を確率的に扱う事項をまとめたものである。このような背景から「土木・建築に関わる設計の基本」¹⁾では、我が国でも構造物全般の設計において性能照査型の設計を目指し、その設計照査には信頼性設計の考え方を基礎とすることが明記されている。この性能照査型の設計とは、構造物が種々の限界状態に対して必要とされる性能を有するか否かについて確率、統計的方法を用いて照査を行うものである。

しかし、トンネルの分野では地盤条件や施工条件に応じて覆工に作用する外力 (土圧) が複雑に異なることなどから許容応力度設計法が採用されているのが現状である。また、シールド工事用セグメントの設計には限界状態設計法の導入が試みられているが、その部分安全係数

は確率、統計的方法を用いて合理的に定められているとは言い難いのが現状である。そこで、本報告では、構造解析に用いられる値の中でばらつきを考慮することで構造計算結果に大きな影響があると考えられる回転ばね定数、側方土圧係数および地盤反力係数のばらつきを確率変数、確率分布で把握し、把握したばらつきからモンテカルロ法で解析を行った結果について確率、統計学的な視点で考察を行った。なお、今回はセグメントの本体部に発生する断面力の解析結果のみ検討を行っており、継手部に発生する断面力の解析結果に対する検討は行っていない。

2. 信頼性設計およびモンテカルロ法と本検討の関係性について

本検討では、ISO2394 の考え方に基づき信頼性設計の理論を用いて構造解析を行った。信頼性設計とはあるシステム (構造物そのものから構造物を構成する要素までのすべてを包含したシステム) が、供用期間中に所定の性能を維持する信頼性を担保する設計であり、その信頼性の担保には確率、統計学が用いられる²⁾。信頼性とは与えられた条件で、要求された機能を果たす性質であり、信頼度とはその定量的な尺度である。本検討では、信頼

度を表す方法としてモンテカルロ法を用いて確率で評価を行った。モンテカルロ法とは乱数を用いる技法の総称である。モンテカルロ法ではある指定された確率分布を持つ乱数を何度も繰り返し用いて解析を行い、多数回の解析結果から普遍性のある共通因子を求める³⁾。本検討では、モンテカルロ法の理論を用いて、シールド工事用セグメントの断面力解析において、設計上有意なばらつきが発生していると考えられる要素の確率変数を算定し、その確率変数に従った乱数を用いて計 30 000 ケースの解析を行った。さらにシールド工事用セグメントの最大曲げモーメントの解析結果の確率変数および確率密度を算定し、解析に用いる定数のばらつきが解析結果の最大曲げモーメントへ与える影響について確率、統計的な見地から検討を行った。

3. 設計条件の設定

(1) 構造細目

本検討で用いるセグメントの仕様および材料特性は、トンネルライブラリー第 23 号、セグメントの設計【改訂版】⁴⁾（以下「セグメントの設計」）に記載されている設計例を参考に、外径が 10.9m の鉄道用シールドトンネル(図-1 および表-1)を想定した。セグメントは図-2 および表-2 に示すように RC 平板型セグメントとし、セグメント継手は図-3 および表-3 のように鋼板ボルト継手の構造を想定した。セグメントの材料特性に関しては表-4 に示した。

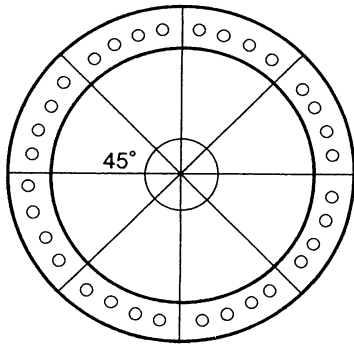


図-1 セグメントの分割

表-1 セグメントの外径など

セグメント種類	RC平板形
外径(m)	10.9
セグメント幅(m)	1.5
セグメント分割数	8等分割
リング継手数	32

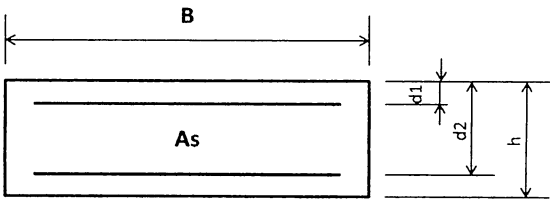


図-2 セグメントの仕様

表-2 セグメントの細目

鉄筋	鉄筋量	D25×12
	有効高さ d1(mm)	55
	有効高さ d2(mm)	395

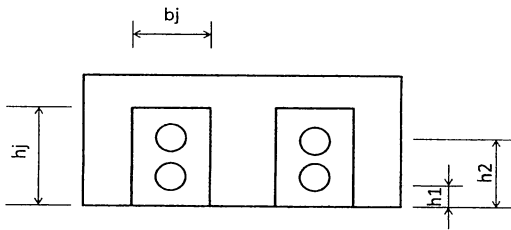


図-3 セグメント継手の仕様

表-3 セグメント継手の仕様

形式	鋼製ボックス	
継手ボルト	本数(本/継手)	2
	径	M27
	鋼材の種類	8.8
	高さ(上段) h1(mm)	100
	高さ(下段) h2(mm)	250
継手板	高さ hj (mm)	280
	幅 bj (mm)	175
	厚さ t (mm)	25

表-4 セグメントの材料特性

コンクリート	
設計基準強度(N/mm ²)	48
許容曲げ圧縮応力度(N/mm ²)	16
ヤング係数(kN/mm ²)	31.4
鉄筋	
鉄筋の種類	SD345
降伏強度(N/mm ²)	345
ヤング係数(kN/mm ²)	210
鋼材(継手板)	
鋼の種類	SM490A
降伏強度(N/mm ²)	315
ヤング係数Es(kN/mm ²)	210

(2) 地盤条件

本検討で用いる地盤条件は「セグメントの設計」⁴⁾に記載されている地盤条件を参考に、図-4のように土かぶり高が15mの中位の粘性土単一土層を設定した。地盤条件の詳細に関しては表-5に示した。ここで γ ：単位体積重量(kN/m³)、 λ ：側方土圧係数、 k ：地盤反力係数(MN/m³)とする。

4. 荷重モデル

本検討の荷重モデルの選定については「セグメントの設計」⁴⁾を参考にして、中位の粘性土および単一土層に用いられる、全土被り土圧および土水一体のモデルを選定した。

また、地盤ばねはノンテンションの全周地盤ばねモデルを用いた。なお基本的な荷重条件は表-6のとおりである。

荷重モデルと地盤ばねのモデルおよび基本的な荷重条件を図-5に示す。

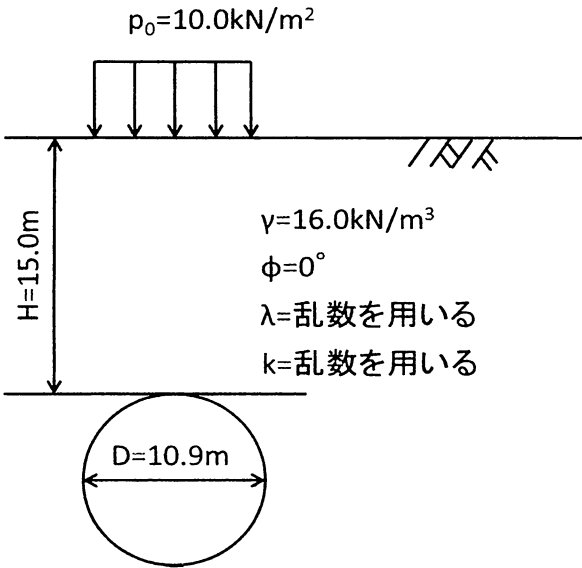


図-4 地盤条件

表-5 地盤物性値

土被り(m)	15.0
地下水位(GL-m)	-
土の種類	中位粘性土
土水の扱い	土水一体
N値	乱数を用いる
γ (kN/m ³)	16
λ	N値から算定
k (MN/m ³)	N値から算定

表-6 荷重条件

荷重条件	粘性土
鉛直荷重(kN/m)	375.00
地盤反力(kN/m)	375.00
平均頂部水平荷重(kN/m)	267.13
平均底部水平荷重(kN/m)	440.18

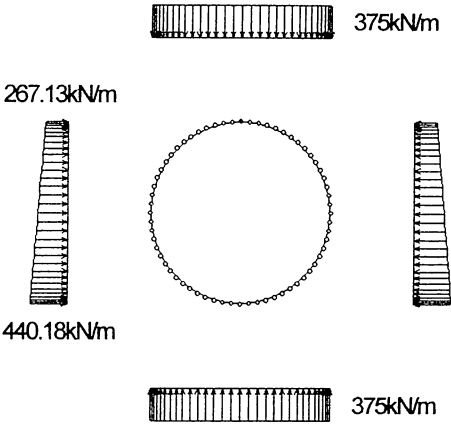


図-5 荷重条件

5. 解析モデル

本検討では、はり-ばねモデル計算法を用いて解析を行った。はり-ばねモデル計算法とはセグメント自体を円弧梁、セグメント継手を回転ばね、リング継手をせん断ばねにモデル化し、継手の剛性低下および千鳥組によるトンネル軸方向の継手位置の違いを評価可能なモデルであり、現在考案されているモデルの中で最もシールドトンネルの挙動を正確に表すことができるモデルである。

解析では継手の剛性低下および千鳥組によるトンネル軸方向の継手位置の違いを適切に評価するために3リングのモデルで解析を行い、結果の検討には中央のリングの解析結果を用いた。

解析ソフトには、「はり-ばねモデル計算法」で計算を行うことのできる Moleman-i を使用した。

6. 構造計算に関する確率モデル

(1) 部材に関する確率モデル

a) セグメント継手

セグメント継手には継手部の施工誤差や継手板およびボルトの品質の誤差によって様々なばらつきが発生していると考えられる。本検討ではセグメント継手に発生しているばらつきを解析に用いる定数の一つである回転ばね定数のばらつきとして考慮することとした。

村上ら⁹⁾によるとセグメント継手の回転ばね定数は、セグメント継手の有効高さに比例して大きくなるとして

いる。したがって、本検討では、セグメントの厚さと回転ばね定数が線形比例すると考え、実験測定値の近似直線からセグメント厚に比例する回転ばね定数の推定直線を算出した。表-7は「セグメントの設計」⁴⁾に記載されているセグメントの回転ばね定数の実験測定値である。図-6は表-7に示した値のうち、縦軸にセグメントの回転ばね定数の実験測定値、横軸にセグメント厚を示したグラフである。そして、この推定直線と実験測定値との差を各セグメント厚の回転ばね定数におけるばらつき量とした。ばらつきの性質を調べるために、シャピロ&ウィルクの方法⁹⁾で正規性（正規分布に即したばらつきであるかどうか）について検討を行った。検定を行った結果、0.955であった。これは小標本の場合の正規性の5%信頼限界下限値 0.923 より大きいことから、回転ばね定数のばらつきは正規分布に従っていることを確認した。

表-7 セグメント厚と回転ばね定数の実験測定値

セグメント(RC平板型)			ばね定数実験値
外径	幅(mm)	厚さ(mm)	$k_0(\text{kN} \cdot \text{m/rad})$
3150	900	125	0.10×10^4
			0.27×10^4
			0.44×10^4
4050	900	175	0.22×10^4
			1.16×10^4
			2.10×10^4
4550	900	200	0.10×10^4
			0.19×10^4
			0.29×10^4
6000	900	250	0.43×10^4
			1.28×10^4
			2.13×10^4
5300	1000	250	3.40×10^4
			3.52×10^4
			3.63×10^4
4200×3800(矩形)	1000	250	2.673×10^4
4500	1200	250	0.71×10^4
5380	1200	250	2.24×10^4
			2.37×10^4
			2.50×10^4
5700	1200	250	2.25×10^4
4550	1200	275	0.84×10^4
4350	1200	300	0.97×10^4
6750	1400	380	13.6×10^4
			15.8×10^4
			18.0×10^4
9500	1200	400	15.1×10^4
10000	1500	400	11.2×10^4
11360	1500	450	6.29×10^4
11360	1500	450	7.91×10^4

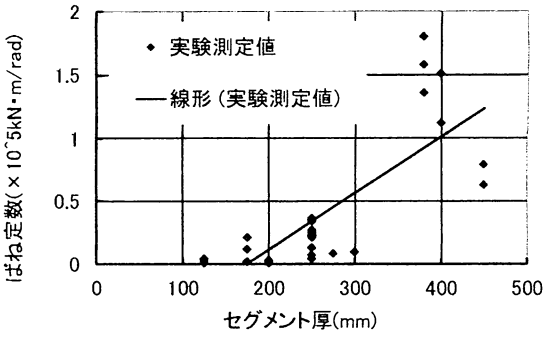


図-6 セグメント厚と回転ばね定数の関係

表-8 回転ばね定数の確率変数

	正曲げ	負曲げ
平均値(kN・m/rad)	185099	110241
標準偏差(kN・m/rad)	25636	15181
変動係数(%)	13.8	13.8
ケース数	10 000	

算定したばらつき量から、回転ばね定数の平均値、標準偏差および変動係数(表-8)を算定し、正規乱数をもちいて回転ばね定数を 10 000 ケース算出した。

b) リング継手

リング継手にもセグメント継手の場合と同じように様々な誤差が発生すると考えられる。はり-ばねモデル計算法では、リング継手はせん断ばね定数で評価される。しかし、現行の設計ではせん断ばね定数の評価は解析値ではなく実験値を用いることが多く、また、実験値のデータ蓄積も少ないため、ばらつきの検討が出来なかった。したがって、本検討ではリング継手に発生するばらつきは無視し、「セグメントの設計」⁴⁾を参考にせん断ばね定数を 200MN/m と設定した。

(2) 荷重に関する確率モデル

a) 鉛直土圧

鉛直土圧は全土被り土圧および土水一体の条件で算定した。鉛直土圧には地盤条件の不均一性などからある程度のばらつきが発生していると考えられる。しかし、後述の水平土圧のばらつきを考慮した方が解析結果の最大曲げモーメントに大きな影響を与えると推測されるので、本検討では、鉛直土圧のばらつきは無視した。

b) 水平土圧

本検討では、水平土圧は全土被り土圧に側方土圧係数 λ を掛け、土水一体の条件で算定した。水平土圧には地盤の不均一性などからある程度のばらつきが発生していると考えられる。本検討では、水平土圧のばらつきを側方土圧係数のばらつきとみなして考慮を行った。この側方土圧係数は、N 値からの推定によりばらつきの算定を

表-9 N 値から側方土圧係数を算定する目安

土水の取扱い	土の種類	λ	N値による目安
土水一体	中位の粘性土	0.65~0.75	$4 \leq N < 8$
	軟らかい粘性土	0.65~0.75	$2 \leq N < 4$
	非常に軟らかい粘性土	0.75~0.85	$N < 2$

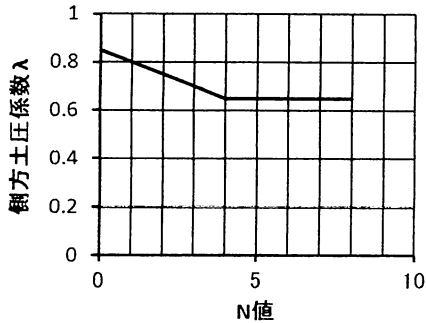


図-7 N 値と側方土圧係数の関係

表-10 側方土圧係数の確率変数

側方土圧係数 λ	
平均値	0.69
標準偏差	0.04
変動係数(%)	5.80
ケース数	10 000

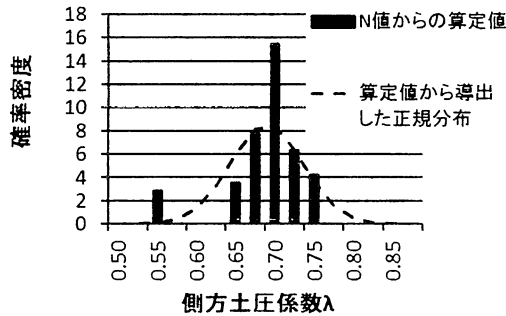


図-8 N 値から算定した側方土圧係数のばらつき

行った。N 値を用いた側方土圧係数の推定には、「セグメントの設計」⁴⁾に記載されている側方土圧係数 λ と N 値の関係を示した表-9 を用いた。表-9 より、N 値と側方土圧係数が図-7 のようなバイリニアの線形関係になると仮定して側方土圧係数の算定を行った。N 値は東京都品川区勝島町の住宅建設の際に行われた土質調査で作成された柱状図から 1 層 10m 以上の粘性土層を計 6 パターン抽出した。抽出した粘性土層の N 値は N 値 3~8 程度であった。抽出した N 値から算定した側方土圧係数の平均値と標準偏差を表-10 に示す。

N 値から推定した側方土圧係数の平均値と標準偏差から正規分布曲線を描き、N 値から推定した側方土圧係数の度数分布から算定した確率密度分布とを比較したものを図-8 に示す。図-8 より、N 値から推定した側方土圧係数の正規分布曲線と推定値を用いて作成した確率密度分布とを比較すると、概ね同じ分布形状であるので、本

表-11 N 値から地盤反力係数を算定する目安

土水の取扱い	土の種類	$k(\text{MN/m}^2)$	N値による目安
土水一体	中位の粘性土	5~10	$4 \leq N < 8$
	軟らかい粘性土	0~5	$2 \leq N < 4$
	非常に軟らかい粘性土	0	$N < 2$

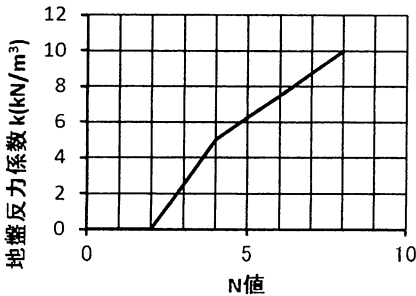


図-9 N 値と地盤反力係数の関係

表-12 地盤反力係数の確率変数

地盤反力係数 k	
平均値(MN/m^2)	7.68
標準偏差(MN/m^2)	1.55
変動係数(%)	20.2
ケース数	10 000

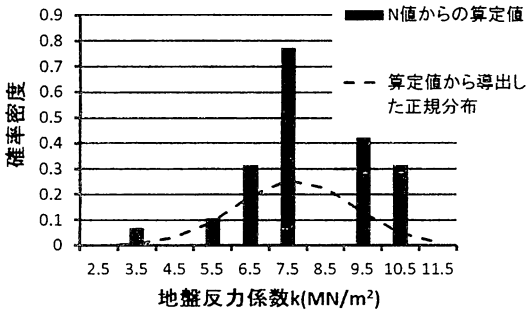


図-10 N 値から算定した地盤反力係数のばらつき

検討では、側方土圧係数のばらつきは正規分布に従うものとして検討を行った。解析には算定した平均値と標準偏差に即した側方土圧係数を正規乱数を用いて 10 000 ケース算出したものを使用した。

c) 地盤反力係数

地盤反力係数も水平土圧と同様に地盤の不均一性などからばらつきが発生していると考えられる。地盤反力係数は本来、坑内水平載荷試験から測定される値を用いるべきだが、同一層内で複数の地盤反力係数を測定したデータがなかったため、本検討では N 値からの推定式で算定を行った。算定には「セグメントの設計」⁴⁾に記載されている地盤反力係数と N 値の関係を示した表-11 を用いた。表-11 より N 値と地盤反力係数が図-9 のようなトリリニアの線形関係になると仮定して地盤反力係数の算定を行った。N 値は側方土圧係数の算定に使用したのと同じものを使用した。算出した地盤反力係数の平均

値と標準偏差を表-12 に示す。算定した地盤反力係数の平均値と標準偏差から地盤反力係数の正規分布曲線を描き、N 値から推定した地盤反力係数の度数分布から算定した確率密度分布とを比較したものを図-10 に示す。図-10 より N 値から推定した地盤反力係数の正規分布曲線と推定値を用いて作成した確率密度分布とを比較すると、概ね同じ分布形状であるので、本検討では、地盤反力係数のばらつきは正規分布に従うものとして検討を行った。解析には算定した平均値と標準偏差に即した地盤反力係数を正規乱数を用いて 10 000 ケース算出したものを使用した。

7. 解析結果

(1) 回転ばね定数のばらつきを考慮した場合

回転ばね定数のばらつきを考慮してモンテカルロ法で 10 000 ケースの解析を行った結果について示す。断面力の解析結果のうち、最大曲げモーメントについて平均値と標準偏差、および変動係数をまとめたものを表-13 に示し、最大曲げモーメントの確率密度分布を図-11 に示す。なお中心部の点線は回転ばね定数を考慮して解析を行った場合の最大曲げモーメントの平均値を示したものである。実線は解析結果の平均値と標準偏差から算出した正規分布である。

最大曲げモーメントの変動係数に着目すると表-13 よ

表-13 回転ばね定数のばらつきを考慮した最大曲げモーメントの確率変数

最大曲げモーメント	
平均値(kN・m)	206.08
標準偏差(kN・m)	9.78
変動係数(%)	4.73

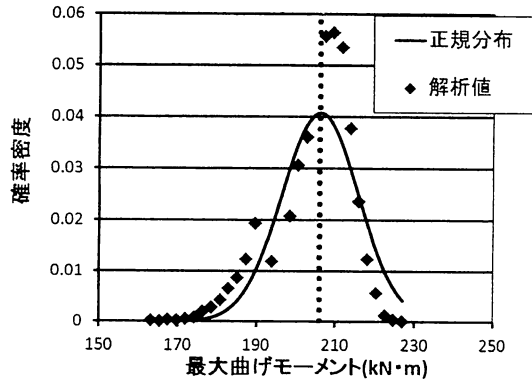


図-11 回転ばね定数のばらつきを考慮した最大曲げモーメントのばらつき

り変動係数は4.73%となり、表-8に示した入力値の回転ばね定数の変動係数である13.8%と比べると約1/3の値となった。

次に図-11の解析値の分布形状に着目すると解析値の分布と正規分布はほぼ重なっており、回転ばね定数のばらつきを考慮して解析した最大曲げモーメントの分布はほぼ正規分布に即していると考えられる。

(3) 側方土圧係数および地盤反力係数のばらつきを考慮した場合

側方土圧係数および地盤反力係数のばらつきを考慮してモンテカルロ法で10 000ケースの解析を行った結果について示す。断面力の解析結果のうち、最大曲げモーメントについて平均値と標準偏差、および変動係数をまとめたものを表-14に示し、最大曲げモーメントの確率密度分布を図-12に示す。なお中心部の点線は側方土圧係数および地盤反力係数のばらつきを考慮して解析を行った場合の最大曲げモーメントの平均値を示したものである。実線は解析結果の平均値と標準偏差から算出した正規分布である。

最大曲げモーメントの変動係数に着目すると表-14より変動係数は41.9%となり、表-10に示した側方土圧係数の変動係数6.7%と比べると約7倍、表-12に示した地盤反力係数の変動係数20.2%と比べると約2倍の値となった。

次に、図-12の解析値の分布形状に着目すると解析値の分布と正規分布は概ね重なっているが、解析値の

表-14 側方土圧係数および地盤反力係数のばらつきを考慮した最大曲げモーメントの確率変数

最大曲げモーメント	
平均値(kN・m)	147.63
標準偏差(kN・m)	61.79
変動係数(%)	41.85

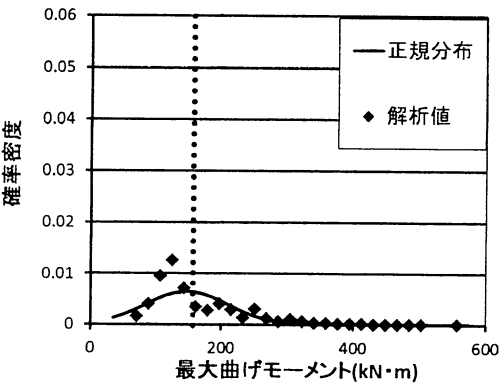


図-12 側方土圧係数および地盤反力係数のばらつきを考慮した最大曲げモーメントのばらつき

分布の方がやや平均値付近で確率密度が高い分布であることがわかる。解析値の確率密度の分布形状を考慮すると、側方土圧係数および地盤反力係数のばらつきを考慮して解析した最大曲げモーメントの分布は概ね正規分布に即していると考えられるが、正規分布よりも、やや平均値付近の確率密度が大きい分布であると考えられる。

(4) 複合的なばらつきを考慮した場合

複合的なばらつきを考慮してモンテカルロ法で10 000ケースの解析を行った結果について示す。断面力の解析結果のうち、最大曲げモーメントについて平均値と標準偏差、および変動係数をまとめたものを表-15に示し、最大曲げモーメントの確率密度分布を図-13に示す。なお、点線は複合的なばらつきを考慮して解析を行った場合の最大曲げモーメントの平均値を示したものである。実線は解析結果の平均値と標準偏差から算出した正規分布である。

最大曲げモーメントの変動係数に着目すると表-15より変動係数は40.2%となり、表-8に示した回転ばね定数の変動係数の約3倍、表-10に示した側方土圧係数の変動係数の約7倍、表-12に示した地盤反力係数の変動係数の約2倍の値となった。

次に、図-13の解析値の分布形状に着目すると解析値の分布の裾野の部分は正規分布とほぼ重なっているものの平均値付近では解析値のほうがかなり大きい確率密度を示している。解析値の確率密度の分布形状を考慮する

表-15 複合的なばらつきを考慮した
最大曲げモーメントの確率変数

最大曲げモーメント	
平均値(kN・m)	152.66
標準偏差(kN・m)	61.31
変動係数(%)	40.16

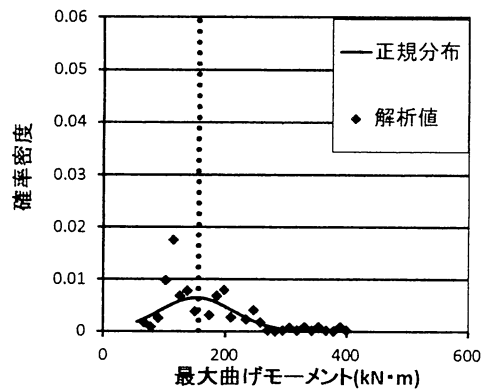


図-13 複合的なばらつきを考慮した
最大曲げモーメントのばらつき

と、複合的なばらつきを考慮して解析した曲げモーメントの分布は正規分布に近い分布ではあるものの平均値付近の確率密度が大きく、今回考慮を行った3ケースでは最も正規分布とは異なった分布であると考えられる。

8. 考察

3つのケースの最大曲げモーメントの解析結果についてまとめたものを表-16に示す。

表-16より回転ばね定数のばらつきによる最大曲げモーメントへの影響は今回検討を行った3つのパターンの中で最も小さく、ばらつきを考慮した解析が必要と考えるほどの差異は発生しなかった。

側方土圧係数および地盤反力係数のばらつきによる解析結果の最大曲げモーメントのばらつきと複合的なばらつきによる解析結果の最大曲げモーメントのばらつきは変動係数で見ても40%程度発生しており、解析に用いる定数のばらつきに対して、解析結果のばらつきが大きくなるという傾向を得た。分布形状はどのパターンでも概ね正規分布に即しており、解析に用いる定数のばらつきの分布形状と解析結果の分布形状は同様の傾向が得られると言える。

今回検討を行った回転ばね定数のばらつきを考慮したパターンと側方土圧係数および地盤反力係数のばらつきを考慮したパターンでは解析に用いる定数の変動係数が同程度でも解析結果の変動係数は10倍程度の差が生じた。そのため、側方土圧係数および地盤反力係数のばらつきを考慮する際には解析結果への影響度を十分に考慮した上で慎重に設定する必要があると考える。

また考慮を行った3ケースを比較すると側方土圧係数および地盤反力係数のばらつきを考慮したケースと複合的なばらつきを考慮したケースでは確率変数、分布形状共に近い値を示した。そのため、回転ばね定数のばらつきと、側方土圧係数および地盤反力係数のばらつきを考慮した場合、解析結果の最大曲げモーメントにおいては側方土圧係数および地盤反力係数のばらつきが与える影響が非常に大きいと考えられる。

表-16 各ばらつきを考慮した
最大曲げモーメントの確率変数

最大曲げモーメント			
	回転ばね考慮	側方土圧考慮	複合考慮
平均値(kN・m)	206.08	147.63	152.66
標準偏差(kN・m)	9.78	61.79	61.31
変動係数(%)	4.7	41.9	40.2
95%信頼限界上限値	217.72	264.54	289.25
95%信頼限界下限値	186.68	76.90	89.03

9. 結論

本報告では回転ばね定数，側方土圧係数および地盤反力係数，複合的なばらつきの計3つのパターンに対して，モンテカルロ法でそれぞれ10000ケース解析を行った。

本検討において得られた知見を以下に，まとめて記す。

- 回転ばね定数のばらつき，側方土圧係数および地盤反力係数のばらつき，複合的なばらつきの3ケースについてばらつきを考慮してモンテカルロ法で解析を行ったところ，解析に用いる定数のばらつきに対して最大曲げモーメントの解析結果のばらつきは変動係数で表すと10倍程度大きくなる可能性があることを確認した。
- 回転ばね定数のばらつき，側方土圧係数および地盤反力係数のばらつき，複合的なばらつきの3つのパターンを考慮して構造解析を行ったところ，解析結果の分布はすべてのパターンにおいて正規分布に近い分布となり，解析に用いる定数のばらつきと解析結果のばらつきは概ね同じ分布形状になると考えられる。
- 回転ばね定数のばらつきを考慮した解析結果と側方土圧係数および地盤反力係数のばらつきを考慮した解析結果を比較すると，側方土圧係数および地盤反力係数のばらつきを考慮した場合のほうが解析結果のばらつ

き変動係数で表すと10倍程度大きくなり，解析結果に対する影響度が大きいことを確認した。そのため，解析結果に対して影響度が大きい側方土圧係数および地盤反力係数のばらつきは慎重に取り扱う必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 国土交通省：「土木・建築にかかる設計の基本」，土木・建築にかかる設計の基本検討委員会，pp1, 2002
- 2) 福井泰好：入門信頼性工学，森北出版，pp8-10, 2006
- 3) 津田孝夫：モンテカルロ法とシミュレーション，培風館，pp1-3, 1990
- 4) 土木学会トンネル工学委員会：トンネルライブラリー23号，セグメントの設計【改訂版】，pp273-302, 2010.
- 5) 村上博智，小泉淳：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，第296号，pp73-86, 1980
- 6) Olive Jean Dunn, Virginia A. Clark：応用統計学，森北出版，pp286-287, 1978

STUDY ON RELIABILITY DESIGN FOR SHIELD TUNNEL SEGMENTS

Ryoichi SAITO and Motoi IWANAMI

The allowable stress design method has been proven to be effective. However, the characteristics of this method make it impossible to specifically determine the risk probability of the design result.

This paper discusses an attempt to calculate effectiveness of segments of a railway shield tunnel, whose specifications were determined by the allowable stress design method, with consideration given to variation of coefficient of earth pressure at rest of ground and variation of rotational spring constant of segment joints.