

地盤物性値のばらつきがシールド工事用セグメントの耐久性能照査結果へ与える影響について

齋藤 良一¹・桑原 正也²・岩波 基³・西村和夫⁴

¹学生会員 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科 都市基盤環境学域

(〒940-2372 東京都八王子市南大沢1-1)

E-mail: saito-ryoichi@ed.tmu.ac.jp

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

E-mail: ci20183b@st.nagaoka-ct.ac.jp

³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

⁴正会員 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科 都市基盤環境学域 教授

(〒940-2372 東京都八王子市南大沢1-1)

E-mail: knishi@tmu.ac.jp

現行のトンネル標準示方書では、シールド工事用セグメントの設計に対して、許容応力度設計法と限界状態設計法が併記されている。そして、限界状態設計法の設計照査方法には部分安全係数が採用されている。しかし、部分安全係数はこれまでの許容応力度設計法での設計計算結果との整合性から定められており、必ずしも合理的な設定が行われているとは言いがたい。そこで、本報告では設計計算に用いる値の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側方土圧係数および地盤反力係数のばらつきを把握し、モンテカルロ法を用いて算定したセグメント本体の曲げ応力度、曲げひび割れ幅および目開き量のばらつきを確率、統計的視点で考察を行った。

Key Words : shield tunnel, reliability design, ground properties

1. はじめに

1998 年、ISO2394「構造物の信頼性に関する一般原則」が発行された。それに伴い我が国でも「土木・建築にかかる設計の基本」¹⁾において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た。このような背景から我が国の土木構造物の設計基準にもこれまでの許容応力度設計法から性能照査型の設計への移行が行われている状況である。一方、シールドトンネルの分野でも 2006 年改訂のトンネル標準示方書シールド編²⁾（以下、示方書と呼ぶ）に限界状態設計法の説明が追加されている。しかし、地盤条件や施工条件に応じて覆工に作用する外力が複雑に異なることなどから限界状態設計法への移行はあまり進んでいない現状にある。まして、性能照査型の設計への移行には課題が多く、今回の示方書

改訂においても見送られる予定である。また、限界状態設計法の設計照査方法には、信頼性設計法のレベル 1 である部分安全係数設計法が採用されているが、現状では、部分安全係数が、本来、確率、統計的方法を用いて定められるべきであるにもかかわらず、合理的に定められているとは言いがたい。そこで前年度、我々は「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計算」³⁾において、シールドトンネルの構造解析に用いる定数のばらつきが解析によって求まる断面力へ与える影響について報告を行った。引き続き、今年度は解析結果のばらつきが、設計用値等のばらつきがほとんどないという評価で部分安全係数の値に 1.0 を採用して照査が行われている使用限界状態の設計結果に与える影響を把握し、現行の使用限界状態設計法における課題を明確にすることを目的とした。

表-1 示方書における終局限界状態および使用限界状態^{2),4)}

			示方書で規定する内容							
			終局限界状態				使用限界状態			
			断面破壊	構造破壊	変形	安定	ひび割れ	変形	目開き	損傷
トンネルライブラリーで規定する内容	構造安定性能	常時作用に対して安定	◎	◎						○
		必要な耐震性能	◎	◎						
		想定される施工時荷重にたいして安定	◎	◎						○
		火災時においても安定	△	△						
	耐久性能	コンクリートが劣化しない			○		○	△	△	
		止水性が良い			◎	○	◎	△	◎	
		防食性が良い					◎			
	利用者の安全性能	安全に走行できる			◎	○		○		
		利用者の安全を直接脅かさない			○		○		○	◎
		非常時に安全に避難できる	△	△	○	○		△		△
	利用者の使用性能	乗り心地が良い			△	○		○		
		利用者に不快感、不安感を与えない					○		○	
	管理者の使用性能	必要な需要を満足できる			△			○		○
		確実に共用できる					△		△	△
		防災機能が確実に機能する			△	△		△		

◎：強い相関関係 ○：中程度の相関関係 △：弱い相関関係

2. 検討方針

現行の示方書では限界状態設計法において終局限界状態²⁾で4つ、使用限界状態でも4つの限界状態を想定して検討を行うものとしている。これに対して、トンネルライブラリー21号「性能規定に基づくトンネルの設計とマネジメント」⁴⁾（以下、トンネルライブラリーとよぶ）では使用者の立場からトンネルに要求される性能を抽出している。ここで示方書において規定する内容とトンネルライブラリーで規定されている内容を照らしあわせたものを表-1に示す。示方書で規定する内容とトンネルライブラリーで規定する内容を比較するとトンネルライブラリーで示した要求性能を示方書の照査の内容が直接保証している項目は多くないことがわかる。たとえばトンネルライブラリーでは構造安定性能について4つの設計上の担保が必要であると述べているが、示方書では終局限界状態として断面破壊、構造破壊、変形、安定の設計照査を行うように規定しており、照査項目とライブラリーにおける要求性能とが一致していないことがわかる。また、トンネルライブラリーに記載されているように耐久性能については3つの性能が要求されると考えられるが、これらに対して示方書では主に使用限界状態として、それらの要求に沿った設計が行われており、現行の示方書でも耐久性能に関しては数値化して照査することが規定されている。このように現在の示方書ではトンネルライブラリーで規定されている各性能のうち利用者と管理者の安全性能や利用者の使用性能などの使用限界に関する性能照査を具体的にを行う項目がなく、また様々な要求性能に対して定量的に照査を行う方法も明確ではない。また、これらの様々な要求性能に対して

定量的な評価を行うことは困難なのが現状である。

示方書における限界状態設計法の各照査でも部分安全係数は、その目安の値と評価方法が導入されている。しかし、部分安全係数の設定によって設計結果が大きく異なるにもかかわらず、現行の部分安全係数の設定は確率、統計論を用いた合理的な設定方法であるとは言い難い。とくに使用限界状態における部分安全係数はすべての値で1.0と設定されている。だが、実際には使用限界状態においても設計用の物性値は様々なばらつきを含んでおり、それらのばらつきが設計結果に与える影響を把握することは非常に重要である。

そこで本報告では現行の使用限界状態の設計法における課題を明確にすることを目的とし、単一成層地盤におけるシールドトンネルの構造解析において、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に、使用限界状態の耐久性能にかかわる現行の照査結果がどの程度の危険確率を有するかを算定した。

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】³⁾（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-2)を想定した。

セグメントは図-2および表-3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-4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

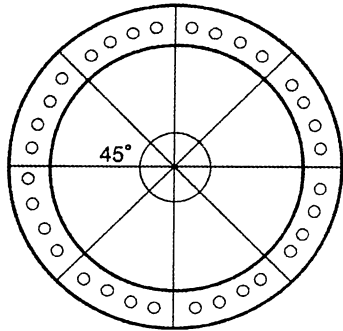


図-1 セグメントの分割

表-2 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

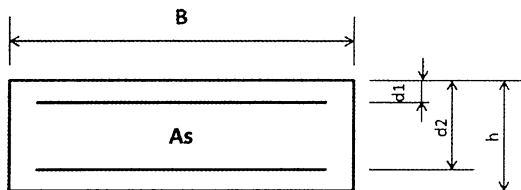


図-2 セグメントの仕様

表-3 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

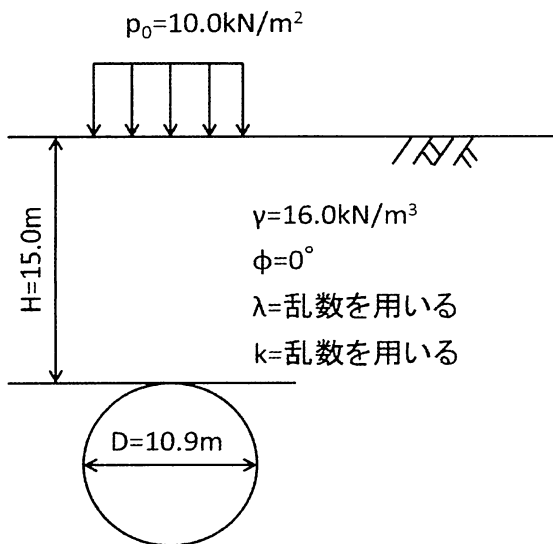


図-4 地盤条件

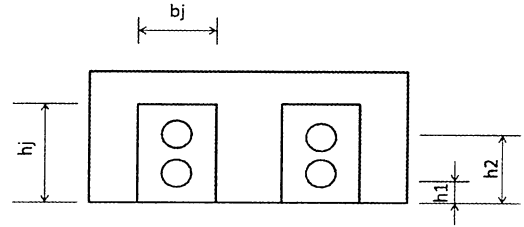


図-3 セグメント継手の仕様

表-4 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
継手板	高さ(下段) h2(mm)	250
	高さ hj (mm)	280
	幅 bj (mm)	175
	厚さ t (mm)	25

表-5 セグメントの材料特性

コンクリート	
設計基準強度(N/mm²)	48
許容曲げ圧縮応力度(N/mm²)	16
ヤング係数(kN/mm²)	31.4
鉄筋	
鉄筋の種類	SD345
降伏強度(N/mm²)	345
ヤング係数(kN/mm²)	210
鋼材(継手板)	
鋼の種類	SM490A
降伏強度(N/mm²)	315
ヤング係数Es(kN/mm²)	210

表-6 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/m³)	16
λ	N値から算定
k (MN/m³)	N値から算定

材料特性に関しては表-5 に示した。

(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」⁵⁾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-6 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」⁵⁾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-7 のとおりである。

荷重モデルと基本的なその値を図-5 に示す。

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。

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. 解析条件

本報告では、ばらつきを考慮する設計用値として、水平方向の土圧を算定する時に用いる地盤の側方土圧係数と地盤反力係数の2つを選定した。どちらの値も比較的数据収集が容易である N 値より推定することができ、かつ設計計算の結果への影響が大きいパラメータと考えられたため、この2つの値のばらつきを考慮することとした。以下に、側方土圧係数および地盤反力係数のそれぞれのばらつきの算定方法について述べる。なお 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から1層10m以上の粘性土層を計5パターン抽出したものを使用した。使用した N 値のヒストグラムを図-6 に示す。

(1) 側方土圧係数

側方土圧係数 λ は、実際には地盤内における様々な要

表-7 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

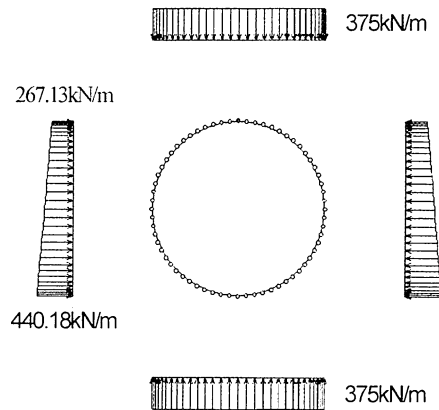


図-5 荷重条件

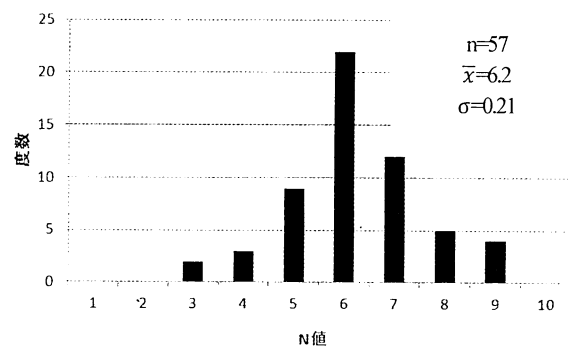


図-6 N値のヒストグラム

素によってかなり大きいばらつきを有する。しかし、本報告では単純に、N 値より推定した側方土圧係数を用いることとした。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」⁵⁾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-8 を用いた。表-8 から 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式になると仮定して N と λ の関係式を式(1)および式(2)のように仮定して使用した。

$$\lambda = 0.85 - 0.05N \quad (0 \leq N < 4) \quad (1)$$

$$\lambda = 0.65 \quad (4 \leq N < 8) \quad (2)$$

算定した側方土圧係数の平均値と標準偏差を表-9 に示す。構造解析には統計処理して求めた平均値と標準偏差に準じた上で、正規乱数を 10 000 個発生させて算出して側方土圧係数を使用した。

表-8 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	$N < 2$

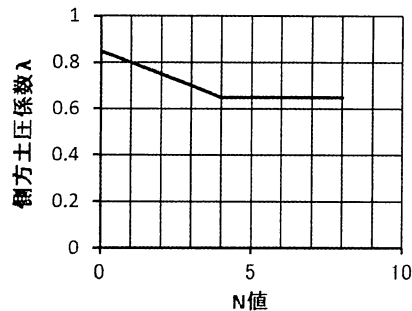


図-7 N値と側方土圧係数の関係

表-9 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

(2) 地盤反力係数

地盤のモデル化は4.荷重モデルでも示した通り、ウィンクラーの仮定をもとに地盤をノンテンションの全周ばねモデルと仮定して考慮を行った。本報告では全周地盤ばねモデルの法線方向に対する圧縮のばね定数を地盤反力係数と定義している。地盤反力係数も(1)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。地盤反力係数は地盤の剛さの指標であるため、本来、坑内水平載荷試験など原位置試験から測定された値を用いてばらつきを求めるべきである。しかし地盤の同一層内で複数の地盤反力係数を測定したデータは少なく、統計的な検討を行うには不十分であった。そこで、本報告ではN値からの推定式を仮定し算定を行った。算定には「セグメントの設計」⁹⁾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-10を用いた。表-10よりN値と地盤反力係数が図-9のようなトリニアの線形関係になると仮定してNとkの関係式を式(3)、式(4)および式(5)のように仮定して使用した。

$$k = 0 \quad (N < 2) \quad (3)$$

$$k = 2.5N - 5 \quad (2 \leq N < 4) \quad (4)$$

$$k = 1.25N \quad (4 \leq N < 8) \quad (5)$$

算定した地盤反力係数の平均値と標準偏差を表-11に示す。構造解析には統計処理して求めた平均値と標準偏差に準じた上で、正規乱数を10 000個発生させて算出して側方土圧係数を使用した。

表-10 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	$k(\text{MN/m}^3)$	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	$N < 2$

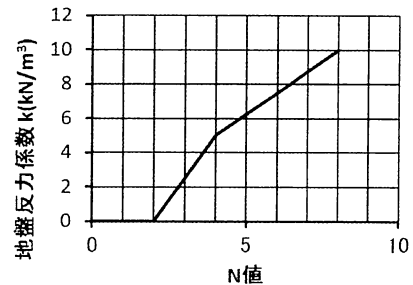


図-9 N値と地盤反力係数の関係

表-11 地盤反力係数の確率変数

地盤反力係数 k	
平均値(MN/m^3)	7.68
標準偏差(MN/m^3)	1.55
変動係数(%)	20.2

7. 解析結果

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を10 000ケース行った。そしてセグメント本体部のコンクリート圧縮応力度、曲げひび割れ幅、目開き角の計算を行い、限界状態設計法における使用限界状態の照査を行った。以下にその結果を示す。

(1)コンクリート圧縮応力度の算定結果と照査

コンクリートの圧縮応力度は示方書に記載の算定方法に基づき算定した。

コンクリート圧縮応力度の算定結果のヒストグラムを網掛けで、算定値から推定した対数正規分布の期待値を実線で図-10に示す。

示方書の使用限界状態で規定されているコンクリート圧縮応力度の制限値は以下の式(7)に示すように定義されている。

$$\gamma_c = 0.4f'_{ck} = 0.4 * 42 = 16.8\text{N/mm}^2 \quad (6)$$

ただし f'_{ck} ：コンクリートの設計基準強度とする。

この値を応力度の制限値とすると、本報告で算定したコンクリート圧縮応力度の最大値は 11.5N/mm^2 であり 16.8N/mm^2 を超える結果は一つもなかった。したがって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コンクリート圧縮応力度の制限値に関する危険確率は0.01%以下であるといえる。

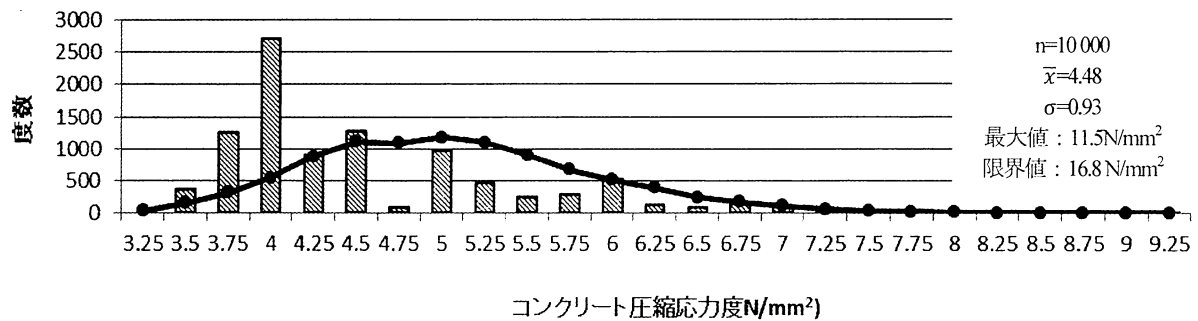


図-10 コンクリート圧縮応力度のヒストグラム

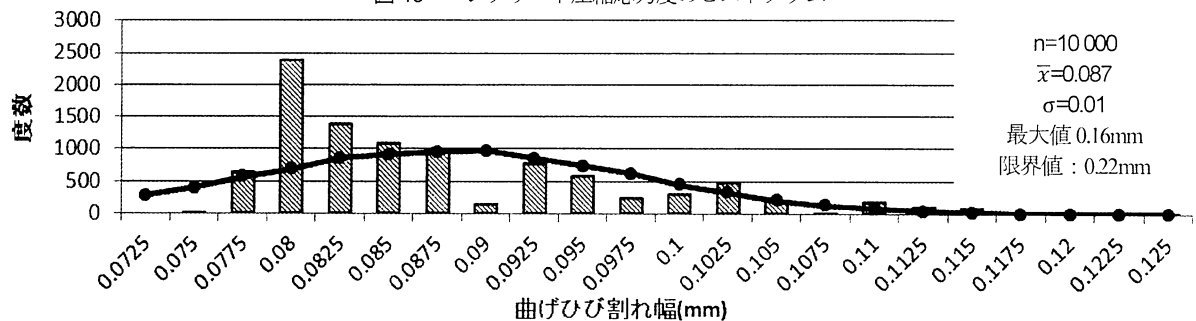


図-11 曲げひび割れ幅のヒストグラム

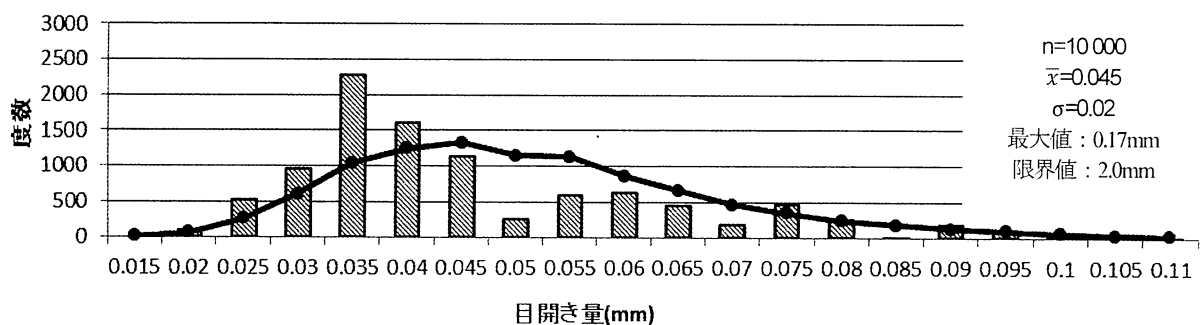


図-12 目開き量のヒストグラム

また、分布形状はおおむね対数正規分布に近いものの、平均値よりも小さい値で度数が多くなっており、対数正規分布よりもさらに尖った分布となった。

(2) 曲げひび割れ幅の算定結果と照査

示方書の使用限界状態の曲げひび割れ幅の算定は以下の式(7)に示すように定義されている。

$$w = l_{\max} * \left[\frac{\sigma_{se}}{E_s} + \varepsilon'_{csd} \right] \quad (7)$$

ここで、 $l_{\max}$ ：配筋筋の最大感覚(200mmに設定)、 σ_{se} ：鋼材位置のコンクリートの応力度が0の状態からの鉄筋応力の増加量、 E_s ：鉄筋のヤング係数、 ε'_{csd} ：コンクリートの収縮およびクリープ等によるひび割れの増加を考慮するための数値である。

この(7)式に基づき算定した曲げひび割れ幅の算定結果のヒストグラムを網掛けで、算定値から推定した対数正規分布の期待値を実線で図-11に示す。

示方書の使用限界状態で規定されている曲げひび割れ

幅の制限値は以下の式(8)に示すように定義されている。

$$w_a = 0.005c = 0.005 * 42.5 = 0.22\text{mm} \quad (8)$$

ただし c ：主鉄筋のかぶり42.5(mm)とする。

この値を曲げひび割れ幅の制限値とすると、本報告で算定した曲げひび割れ幅の最大値は0.16mmであり、0.22mmを超える結果は一つもなかった。したがって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曲げひび割れ幅の制限値に関する危険確率は0.01%以下であるといえる。

また、分布形状はおおむね対数正規分布となっているものの、平均値よりも小さい値で度数が多くなっており、対数正規分布よりもさらに尖った分布であるといえる。

(3) 目開き量の算定結果と照査

示方書の使用限界状態において目開き量および限界目開き量の算定は定式化されていない。本報告では目開き量の算定に「セグメントの設計」に記載されている方法、限界目開き量の算定に「セグメントシール材による止水

設計手引き」⁶⁾（以下、設計手引きと呼ぶ）に記載の方法を用いた。

「セグメントの設計」⁵⁾に記載されている目開き量の算定法は以下の式(8)に示すとおりである。

$$\delta = x * \theta \quad (8)$$

ここで、 x ：セグメントの中立軸高さ(mm)， θ ：継手の回転角(rad)である。

この(8)式に基づき算定した曲げひび割れ幅の算定結果のヒストグラムを網掛けで、算定値から推定した対数正規分布の期待値を実線で図-12に示す

設計手引きによる方法はガasketによる止水メカニズムをもとに、シール材とセグメントとの接面応力と水圧との関係からシール材の設計を行うものである。なお、詳しい算定式については省略するが、設計手引きによる方法で算定したシール材の目開き量は2.0mmであり、これを本報告における限界目開き量とした。本報告で算定した目開き量の最大値は0.17mmであり、限界目開き量の2.0mmを超える結果は一つもなかった。従って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目開き量の制限値に関する危険確率は0.01%以下であるといえる。

また、分布形状はおおむね対数正規分布となっているものの、平均値よりもさらに尖った分布であるといえる。

目開き量は他の2つのケースに比べてやや大きい値の側に偏った分布形であった。これは目開き量の計算では軸力を考慮しなかったため、軸力に比べてばらつきの大きい曲げモーメントに強い影響を受けた結果であるといえる。

8. 結論

本報告ではシールド工事用セグメントの設計において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際に使用限界状態における照査にどの程度影響を与える

か確認した。その結果得られた知見を以下に示す。

- ・使用限界状態における、コンクリート圧縮応力度、曲げひび割れ幅、目開き量の3つの照査を行った結果、応答値が限界値を超える結果はなく、すべての結果で危険確率は0.01%以下であるといえる。
- ・分布形状はコンクリート圧縮応力度、曲げひび割れ幅、目開き量のいずれのケースでも対数正規分布よりもさらに尖った分布であった。
- ・ばらつきを考慮したものの、算定値のすべてのケースで限界値を超えるケースはなかった。そのため、現状の限界状態設計法で設計したセグメントの仕様は、部分安全係数を1.0としても使用限界状態については安全な設計になる可能性が高いことが確認できた。

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) 土木学会：トンネル標準示方書シールド編，土木学会，pp276-289，2006
- 3) 土木学会トンネル工学委員会：トンネルライブラリー21号，性能規定に基づくトンネルの設計とトンネルのマネジメント，pp54-60，2008
- 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】，pp.273-302，2010.
- 5) 齋藤良一，岩波基：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，第21回トンネル工学研究発表会報告集，pp355-362，2011
- 6) 日本トンネル技術協会：セグメントシール材による設計手引き，1997

(2012.9.3 受付)

STUDY ON INFLUENCE OF VERIFICATION RESULTS FOR SEGMENTS BY GROUND PROPERTIES DISPERSION

Ryoichi SAITO, Masaya KUWAHARA, Motoi IWANAMI and Kazuo NISHIMURA

Nowadays, Limit state design is introducing for shield segment design. Partial safety factor is most important factor for limit state design. But the partial safety factor is illogical value.

This paper discusses an attempt to calculate effectiveness of segments of a railway shield tunnel, whose specification were determined by the limit state design, with consideration given to variation of coefficient of earth pressure at rest of ground.