

## ◆報文◆

# 砂礫地盤中のシールドトンネルの作用荷重の研究

石村利明\* 藤井邦男\*\* 真下英人\*\*\*

## 1. はじめに

シールド工法は、開削工法や山岳工法などの他の工法に比べて地表面沈下や周辺構造物への影響、あるいは地下水への影響など、環境保全面で有利な工法として、都市部の代表的なトンネル工法として多く適用されている。しかし、シールド工法においてはセグメント製作費がトンネル工事費全体に占める割合は大きく、このコストダウンが大きな課題となっている。その一つの方法として、合理的なセグメント構造や継手構造の開発などが考えられるが、最も重要なことは合理的な設計手法の確立である。

現在のシールドトンネルの覆工の一般的な設計法は、設計荷重を設定し、構造計算を行ってセグメントの材質・断面寸法を決定する方法となっている。しかしながら、現状では基本となるシールドトンネルに作用する設計荷重は、主として経験や実績に基づいて設定されており、施工対象とする地盤を粘性土地盤か砂質土地盤に分類し、地盤強度とトンネル諸条件によって全土被り土圧か緩み土圧かのいずれかを設定することとなっている。今後の地下空間の利用ニーズとして高い土被りの深いシールドトンネルや大断面のシールドトンネルは、作用土圧の評価によって覆工の構造が大きく異なり、設計荷重を正しく設定できない場合には過小、あるいは過大なセグメント設計になる可能性がある。したがって、トンネル構造物の安全性の確保とともに、コストダウンの1つの方法として、覆工設計時に用いる設計荷重の合理的な設定方法の確立が急務となっている。

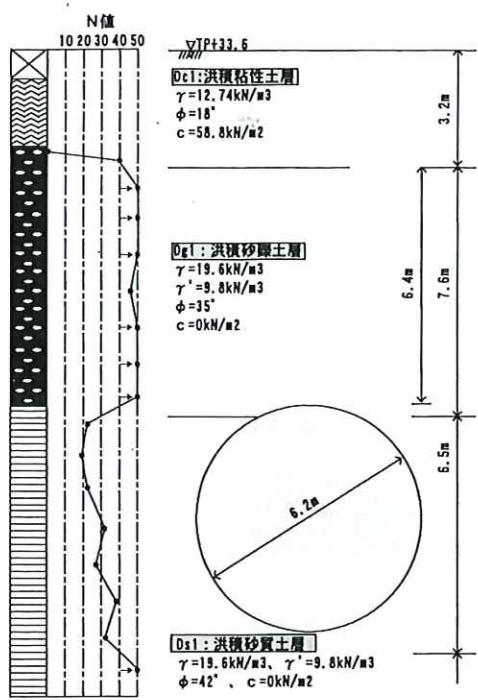
トンネルに作用する荷重を、理論的に定めることは困難であるが、これまでの知見および現場計測から得るものは多く、特に現場計測結果は作用荷重の評価を行う上で非常に重要となる。そこで、

Load Acting on Shield Tunneling in Gravel Ground

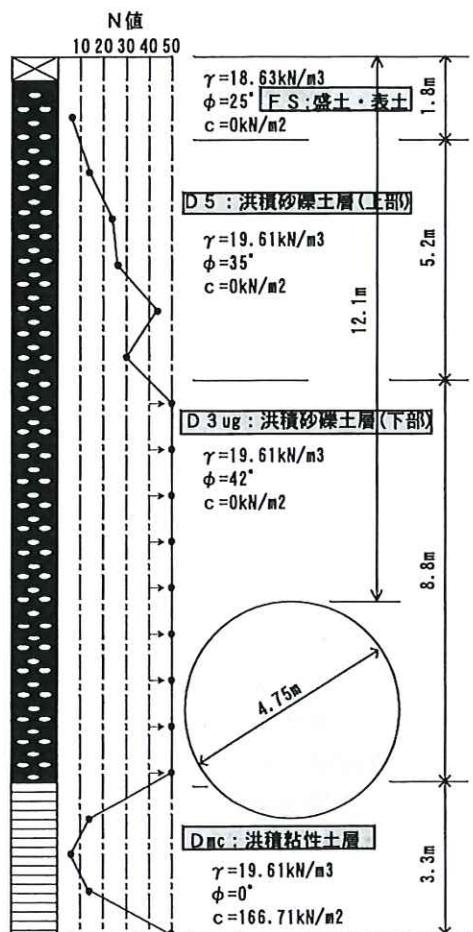
表-1 計測トンネルの概要

トンネル名	A トンネル	B トンネル
トンネル延長 (m)	2,548	3,075
シールド外径 (mm)	6,340	4,890
シールド形式	泥土加圧式	泥土加圧式
土被り H(m)	8.4~9.6	7~15
土被り比 H/D	1.4~1.5	1.5~3.2
トンネル上部の主な地質	洪積粘性土 洪積砂礫土	洪積砂礫土
掘削部の主な地質	洪積砂礫土洪積砂質土	洪積砂礫土
セグメント種類	コンクリート平板型	コンクリート平板型
セグメント外径 D (mm)	6,200	4,750
セグメント内径 (mm)	5,650	4,300
セグメント幅 (mm)	1,000	1,200
単位周長重量 (kN/m) (縦断方向単位長さ)	7.01	5.74
セグメント分割数	6	6
セグメントの組み方 (Kセグメントの中心位置)	2リング千鳥 (天端から 17.1°)	2リング千鳥 (天端から 22.5°)
計測地点土被り (m)	9.6(1.5D)	12.1(2.5D)
計測対象断面数	隣接する2断面	隣接する2断面
計測断面	断面I・断面II	断面α・断面β
計測項目 (断面数)	土圧・水圧(1) 鉄筋応力(2)	土圧・水圧(1) 鉄筋応力(2)
測定値の初期値	計測用リング組立直後	計測用リング組立直前

本研究は、硬質の砂礫地盤中に建設されたシールドトンネルにおいて実施された現場計測結果をもとに、セグメント設計に用いる設計荷重について検討を行った。主な検討は、現場計測で得られた土圧および水圧の評価とともに、鉄筋応力から求めたセグメントに発生する断面力と骨組み解析によって求めた断面力とを比較検討を行い、セグメント設計における設計荷重の評価を行った。さらに、従来から主なセグメント設計法として用いられている慣用計算法(セグメント継手による剛性低下を考慮せずに、セグメントリングを曲げ剛性一様なリングと考え、リングに設計荷重を与える方法)では、セグメント自重に対する地盤反力を考慮せずに設計を行っているが、セグメント組立時での連続した計測結果をもとにセグメント組立時におけるセグメント自重の影響の程度を把握し、実現象を評価できるセグメント自重の取扱い方法について検討を行った。



(a) A トンネル



(b) B トンネル

図-1 各トンネルの土質状況

## 2. 計測トンネルの概要

表-1に今回対象とした2件のシールドトンネ

ルの概要、セグメントの諸元および計測内容を示す。図-1は計測断面に最も近傍位置のボーリングデータをもとにトンネル位置と土質の状況を示したものである。

A トンネルが施工された付近の地質は、地表上部から埋土・表土、洪積粘性土、洪積砂礫層、洪積砂質土層により構成されており、周辺のボーリング調査によれば、洪積粘性土、洪積砂礫層、洪積砂質土層のN値は、それぞれ3~7、30以上130未満、50以上110未満となっている。また、洪積砂礫層、洪積砂質土層の透水係数kは、それぞれ $1.8 \times 10^{-2}$ 、 $2.3 \times 10^{-2}$ cm/sec程度であり透水性は良い状態である。

B トンネルが施工された付近の地質は、地表上部から盛土・表土層、洪積砂礫層、洪積粘性土により構成されている。盛土・表土層は、道路改良工事に伴うもので玉石を含んだ砂礫となっている。洪積砂礫層の上部はφ20~50mmの礫を主体とする礫層であり、N値42~48とよく締まった状態で、透水係数k =  $1.0 \times 10^{-2}$ cm/sec程度であり、透水性は良い状態である。洪積砂礫層の下部はφ20~50mmの礫を主体とし、所々でφ70~150mm程度の玉石を含んでいる。N値は20~50の範囲にばらつきがあるが、ほとんどはN値が30以上のよく締まった状態にあり、透水係数k =  $4.0 \times 10^{-2}$ cm/sec程度であり透水性は良い状態である。

## 3. 土圧計および水圧計による作用土圧

図-2は計測開始から3ヶ月後のはば安定したと考えられる最終的な土圧計(水圧の値も含む)および水圧計の計測値を示したものである。

A トンネルは、土圧計の計測結果によれば天端に作用する最終的な荷重は、70kN/m<sup>2</sup>程度となっている。トンネル周辺のボーリング孔での地下水位および水圧計の値から得られる地下水位の位置はトンネル天端付近となり、セグメント設計の荷重として土水分離の全土被り荷重を想定し地下水位をトンネル天端と設定すると、天端に作用する鉛直荷重は、水圧で0kN/m<sup>2</sup>、土圧で約170kN/m<sup>2</sup>程度となることから、この値と比較すると、セグメントに作用する荷重は全土被り土圧の約4割となる。

B トンネルは、土圧計の計測結果によれば最終的な作用荷重は、80~170kN/m<sup>2</sup>程度となっている。トンネル周辺のボーリング孔での地下水位お

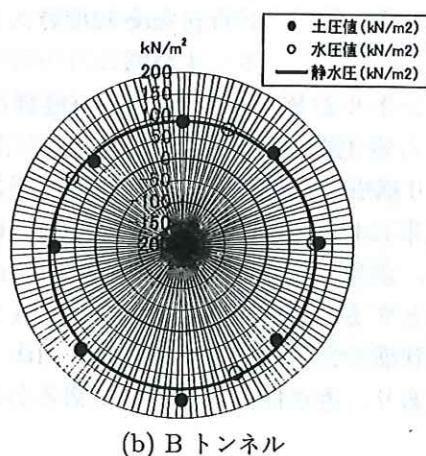
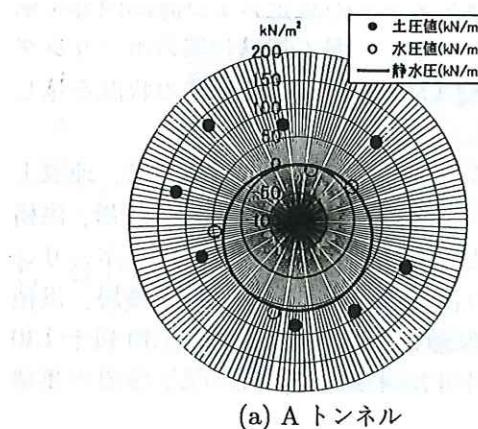


図-2 土圧計・水圧計の断面分布(計測開始約3ヵ月後)

および水圧計の値から得られる地下水位の位置はトンネル天端から上約9mとなり、土圧計の値は静水圧の値とほぼ一致することから、トンネルには水圧のみが作用し、土圧は作用していないものと判断できる。

#### 4. 覆工断面力から推定される作用土圧

計測データが収束したと考えられる計測開始後3ヶ月経過時における鉄筋計の計測値から求めた断面力(曲げモーメント)と土圧などの荷重等をパラメータとした解析より算定した断面力の比較を行い、シールドトンネルに作用する土圧を検討した。

##### 4.1 解析方法

断面力の算定は、図-3に示すようにセグメントを直線梁、セグメントのピース間継手を回転ばね定数  $k_\theta$  の回転ばね、リング間継手をせん断ばね定数  $k_s$  の接線方向と半径方向のばね、地盤反力を表現する地盤ばねにモデル化した2リング梁ばねモデルを使用した。地盤ばねの配置は、セグメントリングが地盤方向へ変位(圧縮側)する場合のみ生じるものとし、セグメント内方への変位(引張側)によっては生じないものとする部分地盤ばねモデルを基本とした。図-4は土圧などを算

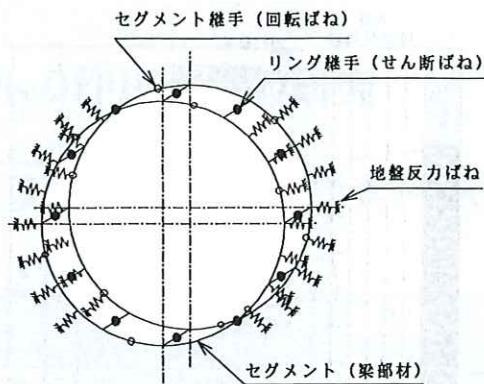


図-3 解析モデル

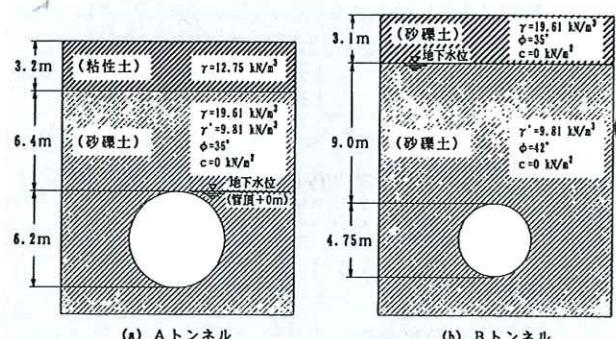


図-4 地盤モデル

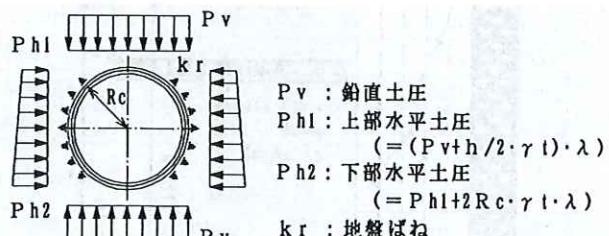


図-5 荷重モデル

出するにあたっての地盤条件を設定したものである。解析に用いる荷重は、図-5に示すように従来の慣用計算法での荷重系とし、セグメントの自重については、Aトンネルにおいては計測結果から求められている曲げモーメントがセグメント組立直後を初期としており、自重の影響が含まれていないことから考慮せず、Bトンネルにおいてはセグメント組立直前を初期としていることからセグメント自重の影響を考慮するものとした。また、Bトンネルにおける安定時の解析では外荷重(土圧・水圧)に自重を加え同一の地盤ばねで支持させる設定を基本とした。解析に用いたパラメータを表-2に示す。なお、土圧・水圧、側方土圧係数および地盤反力係数については「トンネル標準示方書(シールド編)・同解説<sup>1)</sup>」を参考に設定した。回転ばね定数については村上・小泉によるばね算定モデル<sup>2)</sup>を参考とした計算値を基本とした。

表-2 解析に用いたパラメータ

鉛直土圧・水圧	全土被り土圧、緩み土圧、水圧のみ (土水分離方式)
水平土圧 側方土圧係数: $\lambda$	$\lambda = 0.35, 0.45, 0.55$
セグメント自重	考慮しない(Aンネル) 考慮する(Bトンネル)
地盤反力 (地盤反力係数: $k$ )	$k = 10, 30, 50 (\text{MN/m}^3)$ (A, Bトンネル、安定時の解析) $k = 1, 10, 100 (\text{MN/m}^3)$ (Bトンネル、テール内における自重解析)
セグメント継手の 回転ばね定数	$k\theta = 6.7 \sim 323.6 (\text{MN} \cdot \text{m}/\text{rad})$ (計算値) $k\theta = 8.88 (\text{MN} \cdot \text{m}/\text{rad})$ (Aトンネル、実験値)
リング継手の せん断ばね定数	$k_s = 1.96 \times 10^3 (\text{MN/m})$ (過去の同構造シールドトンネルでの実験値)
セグメントの 弾性係数	$31.44 (\text{kN/mm}^2)$ (Aトンネル、実験値) $32.36 (\text{kN/mm}^2)$ (Bトンネル、設計値)

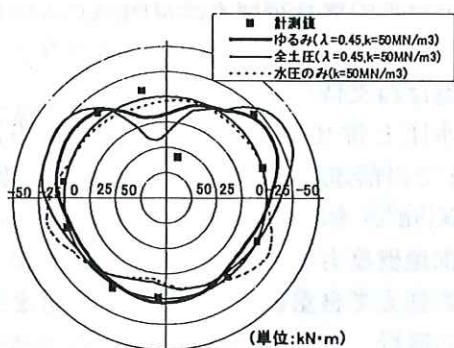
せん断ばね定数については、A・Bトンネルとともに、過去に行ったほぼ同構造のシールドトンネルでの検討時に用いた値  $k_s = 1.96 \times 10^3 \text{ MN/m}^3$  を採用した。なお、回転ばねおよびせん断ばねの特性は線形として取り扱った。

#### 4.2 解析結果および考察

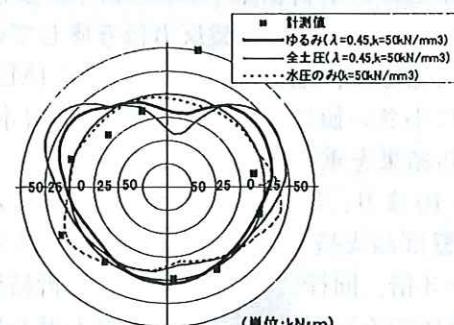
##### (1) 安定時のトンネル作用荷重

###### 1) Aトンネルの場合

図-6に計測開始後3ヶ月時点の鉄筋計の計測値から求めた断面力と概ね計測断面力に近似した値



(a) 計測断面 I



(b) 計測断面 II

図-6 計測断面力および解析断面力  
(Aトンネル: 計測開始3ヶ月後)

を与える条件(側方土圧係数  $\lambda = 0.45$ 、地盤反力係数  $k = 50 \text{ MN/m}^3$ )における解析断面力の断面分布を示す。

設計時においては、土被りが約 1.5D (D: セグメント外径) と浅いことを考慮して全土被り土圧を採用しているが、解析結果からはゆるみ土圧程度の荷重が作用している結果となった。解析条件として設定したトンネル

天端のゆるみ土圧は  $98.4 \text{ kN/m}^2$  と全土被り土圧  $166.3 \text{ kN/m}^2$  の約 6 割であり、前述した土圧計および水圧計による計測値が全土被り土圧の約 4 割となっていることから、鉄筋計から得られた結果は土圧計および水圧計から得られた結果と概ね一致していると言える。

###### 2) Bトンネルの場合

図-7に計測開始後3ヶ月時点の鉄筋計の計測値から求めた断面力と概ね計測断面力に近似した値を与える条件(側方土圧係数  $\lambda = 0.45$ 、地盤反力係数  $k = 50 \text{ MN/m}^3$ )における解析断面力の断面分布を示す。

設計時においては、土被りが約 2.5D (D: セグメント外径) と若干大きいことからセグメント外径の 2 倍 (=9.5m) の高さに相当するゆるみ土圧を採用し、セグメント仕様を決定しているが、解析からは水圧のみ(地盤反力係数  $k = 50 \text{ MN/m}^3$ )が作用している結果となった。これは、前述した土圧計および水圧計による計測結果とも一致している。

###### (2) セグメント自重の取り扱いの検討

従来から用いられているセグメント設計法である慣用計算法においては、図-8に示すように自重解析時による地盤反力を考慮しない場合が多いが、これまでの現場計測事例および近年のシールド工事における裏込め注入技術の発達、真円保持装置やシャッキ推力の適正使用等により、セグメント自重による地盤反力を考慮できる場合があると考えられることから、セグメントがシールド機内(テール内)にある場合のセグメント自重の影響、および安定時の自重の取り扱い方法について検討を行った。

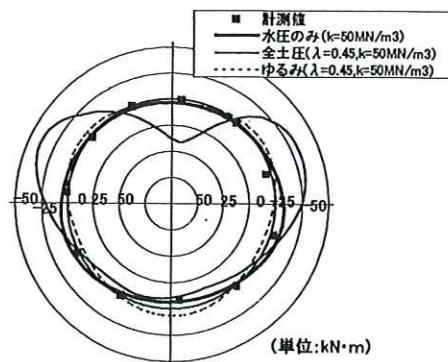
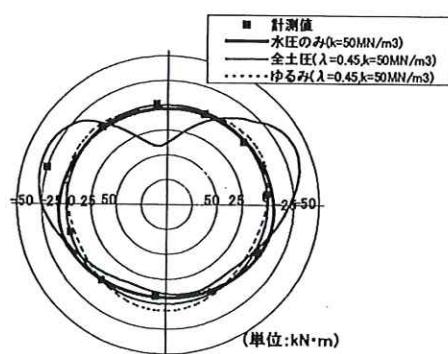
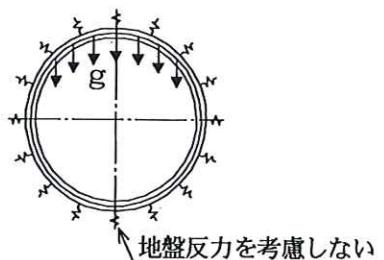
(a) 計測断面  $\alpha$ (a) 計測断面  $\alpha$ (b) 計測断面  $\beta$ 図-7 計測断面力および解析断面力  
(Bトンネル: 計測開始3ヶ月後)

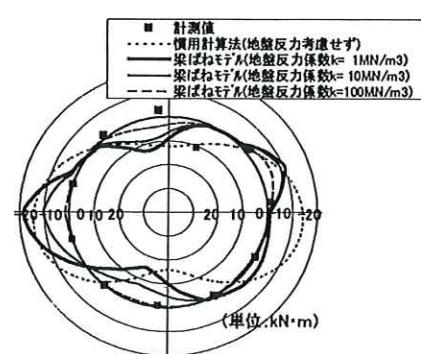
図-8 慣用計算法における自重の取り扱い

## 1) テール内におけるセグメント自重の影響

図-9にセグメント組立直後のテール内における鉄筋計の計測値から求めた断面力と解析より得られた断面力の断面分布図を示す。図-9には参考として設計時に慣用設計法で求められた自重による曲げモーメントの値も示した。図より局所的な値を除けば概ね計測断面力は解析断面力より小さく、近似させるためには地盤反力係数  $k = 100\text{MN}/\text{m}^3$  以上の値を設定する必要がある。これより、従来の設計法である慣用設計法において考慮していた自重による設計断面力を低減できる可能性があると考えられる。

## 2) 安定時における自重の取り扱いの検討

図-10に計測開始後3ヶ月時点の安定時を対象として、計測断面力と自重の取り扱い方法を変化

(a) 計測断面  $\alpha$ (b) 計測断面  $\beta$ 図-9 自重の影響による断面力分布  
(Bトンネル: セグメント組立直後 (テール内))

させた場合の解析値との比較を示す。なお、セグメント自重の取り扱い方法は図-11に示す3方法とした。

## ①地盤ばね支持

土水圧と併せて地盤ばね支持する方法(基本設定)で、前述の近似ケース(地盤反力係数  $k = 50\text{MN}/\text{m}^3$ 、水圧のみ)による解析

## ②底部地盤反力を考慮

①に加えて自重による底部地盤反力を考慮した場合の解析

## ③自重と外荷重との重ね合わせ

自重のみの解析結果(従来の慣用計算法では自重による変形に伴う地盤反力は考慮していないことに対応させ、地盤反力係数は  $k = 1\text{MN}/\text{m}^3$  と十分に小さい値に設定した)に外荷重(水圧のみ)の解析結果を重ね合わせる方法

図-10より、②底部地盤反力を考慮した場合は①地盤ばね支持(基本設定)近似ケースの場合の約2~3倍、同様に③自重のみの解析結果に外荷重(水圧のみ)の解析結果を重ね合わせた場合は約3~4倍の曲げモーメントを算出する結果となっている。よって、現場計測結果から得られた実現象を評価できるセグメント自重の取り扱い方法につ

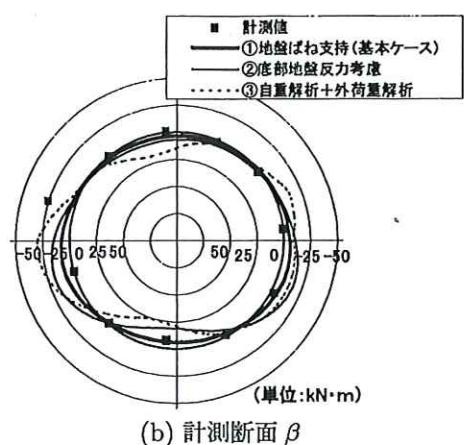
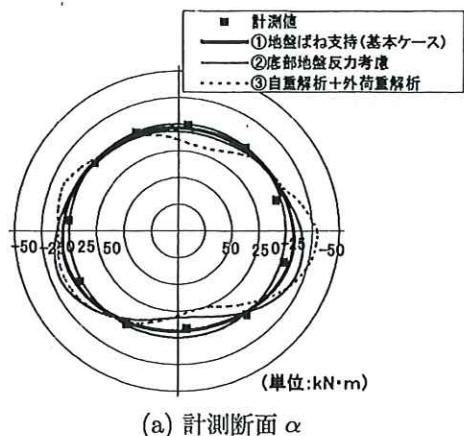


図-10 自重の取り扱いの違いによる断面力分布

いては、本検討のように梁ばねモデルを使用し、地盤ばねにより支持させる解析モデルが一つの方法であると考えられる。

## 5. まとめ

本研究より得られた結論を以下に示す。

- (1) トンネルに作用する荷重は、土被り比が 1.5 程度の場合は緩み土圧程度以下、さらに土被り比が約 2.5 程度と大きい場合は静水圧程度となる場合がある。
- (2) セグメント組立時においてはセグメント自重に起因する断面力はほとんど発生せず、

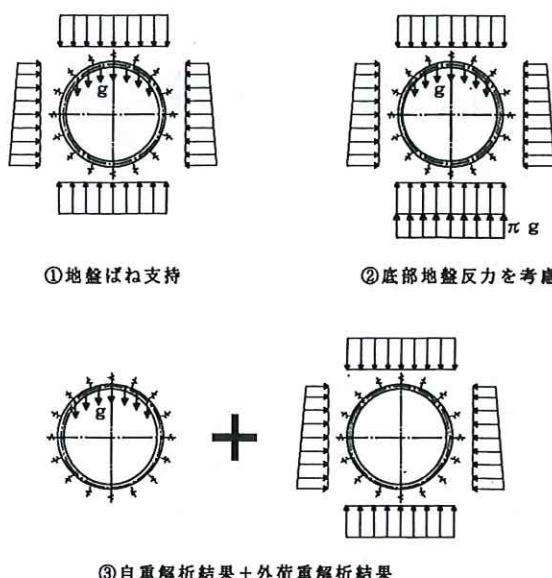


図-11 自重の取り扱い方法

従来、慣用計算法で考慮されていた自重による断面力を低減できる可能性が高い。

(3) セグメント自重の取り扱い方法については、本検討のように梁ばねモデルを使用し、地盤ばねにより支持させる解析モデルが一つの方法である。

今後の課題としては、今回対象としたような硬質の砂礫地盤中における設計荷重のより合理的な設定方法の確立、施工時における荷重の主要因および発生メカニズム等の解明、施工時荷重の定量化および長期的な影響度の把握等が挙げられる。

## 参考文献

- 1) 土木学会：トンネル標準示方書（シールド工法編）・同解説, 1996.
- 2) 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, No.296, 1980.4.
- 3) 東京湾横断道路の構造・施設設計に関する調査研究, 土木研究所報告第 184 号, 1991 年 3 月

石村利明\*



独立行政法人土木研究所基礎道路技術研究グループトンネルチーム主任研究員  
Toshiaki ISHIMURA

藤井邦男\*\*



(前 建設省土木研究所道路部  
トンネル研究室交流研究員)  
Kunio FUJII

真下英人\*\*\*



独立行政法人土木研究所基礎道路技術研究グループトンネルチーム上席研究員, 工博  
Dr. Hideto MASHIMO