

MIDAS CONSTRUCTION TECHNICAL SEMINAR

シールドトンネルの近接・ 併設の影響と設計検討手法 (その1)

国土舘大学 教授
堀地 紀行

MIDAS × HORICHI

堀地 紀行

Noriyuki HORICHI

- # 併設シールドトンネル
- # 計測データ
- # 数値解析方法
- # 設計・施工対策

国土舘大学 理工学部 教授、
同大学院(修士課程、博士課程) 教授

学歴・経歴

早稲田大学理工学部卒業。同大学院修士課程修了。早稲田大学博士(工学)の学位を取得
日本鉄道建設公団(現鉄道運輸機構)に入社。

津軽海峡線(北海道新幹線)、仙台市地下鉄南北線、京葉都心線、北陸新幹線・リニア実験線等の
建設とリニア中央新幹線調査、本社計画部、本社設計技術室等に約20年間勤務の後、国土舘大学教授。
その間、ロンドン大学シティー校客員研究員(教授)、ケンブリッジ大学客員研究員(教授)、
アジア工科大学院(ハノイ校)招聘教授。

シールドトンネル、山岳トンネル、鋼コンクリート複合構造等のテーマで国内外の学協会に40編程の
論文、報告等を投稿。

(一社)日本鉄道施設協会優秀論文賞、(公益)日本推進技術協会黒瀬賞受賞。
ロンドン市よりロンドン名誉市民称受章。技術士(建設部門)。

MIDAS CONSTRUCTION
TECHNICAL SEMINAR

シールドトンネルの 近接・併設の影響と 設計検討手法(その1)

国土舘大学 教授
堀地 紀行

MIDAS × HORICHI

AGENDA

Session.1

土木学会標準示方書による近接・併設事項の確認

Session.2

左右併設シールドの現場計測と覆工の解析・検討

Session.3

下部通過シールドの現場計測と覆工の解析・検討

Session.4

まとめ

シールドトンネルの近接・併設の影響と設計検討手法(その1)

国土舘大学 教授 堀地 紀行

MIDAS

Session.1

土木学会標準示方書による 近接・併設事項の確認

2.11 近接施工の影響

シールドトンネルの施工時、または完成後に他の構造物が近接して施工されることがあらかじめ予想される場合には、その影響を十分に検討しなければならない。

【解 説】 設計の対象となるシールドトンネルの施工時または完成後に、他の構造物が近接して施工される場合には、当該のトンネルは近接施工に伴う周辺の地山の乱れの影響や、作用する荷重の変動の影響を受けるため、必要に応じて覆工を補強したり、適切な防護工や地盤改良を行うことが必要となる。このような状況が予想される場合には、当該のトンネルに与える影響を十分に検討し、これをあらかじめ設計に反映することが望ましい。また、上部にシールドトンネルが施工される場合、上部のトンネルの受けた荷重が下部のトンネルに作用し、下部のトンネルに損傷を与えた事例があるので注意する必要がある。

とくに、以下に示すような場合には、その影響が大きいと考えられるため、荷重の評価を適切に行うとともに、荷重の経時的変化を考慮した合理的な計算方法（荷重履歴や覆工の応力履歴）を検討する必要がある。また、将来の荷重変動に対して二次覆工を構造部材として評価する場合には、その適切な構造計算モデルを十分に検討することが必要である。

- ① トンネルの直上またはその近傍に新たな構造物が建設され、上載荷重が大きく変化する場合
- ② トンネルの直上、直下またはその近傍が掘削され、鉛直土圧や水平土圧等の荷重条件および地山の物性が大きく変化する場合（併設トンネルの状態が想定される）
- ③ トンネルの側方の地盤が乱され、側方土圧または地盤反力が大きく変化する場合
- ④ トンネルに作用する水圧が大きく変化する場合

④ トンネルに作用する水圧が大きく変化する場合

これらの場合において、その影響が一時的なものと、長期にわたるものがあるので、検討に際しては、慎重にこれを見極める必要がある。なお、シールドトンネルが併設して施工される場合の検討は、第2編 2.12を参照のこと。

2.12 併設トンネルの影響

トンネルを近接して併設する場合には、地山の条件および施工条件等を考慮し、必要に応じてトンネルの相互干渉および施工時の影響について検討しなければならない。

【解説】 ここでいう併設トンネルは、複数のトンネルが一定の区間において上下、左右、斜めに並行し、近接して設置される場合を想定するものであり、このような場合には、複数のトンネルの相互干渉による土圧の偏りや地盤の緩みの影響、あるいは切羽圧や裏込め注入圧等の施工時荷重による影響について検討する必要がある。

前者はシールド施工後も永続する長期的な作用、後者はシールド施工時のみの短期的な作用である。これらの作用に対し、必要に応じて覆工の補強または地盤改良や変形防止工等の補助工法を併用するなど適切な対策を講じなければならない。

近年、都市部のシールドトンネルは他の地下構造物との近接、狭あいな地下空間での施工等の種々の制約を受け、複数のトンネルを併設する場合に、離隔距離を小さくして構築する事例が増えており、鉄道トンネルの場合30cm程度、道路トンネルの場合でも50cm程度の離隔距離で施工された実績もある。これらの併設トンネルでは地山の条件、トンネル相互の位置関係、トンネルの外径、トンネル相互の施工時期およびシールドの形式等によって、トンネルの横断方向または縦断方向に単設トンネルとは異なる変位や応力が発生し、状況によってはトンネル覆工の安全性に影響を与える場合もある。併設トンネルの影響を検討する場合にはこのことを十分認識するとともに、影響を与える各種の要因についても十分な調査が必要である。

一般の場合、併設トンネルの検討にあたり配慮すべき主な事項は次のとおりである。

シールドトンネルの
近接・併設の影響と
設計検討手法(その1)

国土舘大学 教授
堀地 紀行

Session.1 標準仕方書の確認

8

- 1) トンネル相互の位置関係
- 2) 周辺地盤の性質
- 3) トンネルの外径
- 4) 後続トンネルの施工時期
- 5) シールドの形式
- 6) 施工時の荷重

1)について 併設するトンネルの位置が水平方向、上下方向いずれの場合においてもその離隔距離が後続するトンネルの外径 ($1D_o$) 以内となる場合には十分な検討が必要である。トンネルの離隔距離が小さくなるほどその影響は増大することが判明しており、とくに離隔距離が $0.5D_o$ 以下となる場合には詳細な検討を行う必要がある。トンネルを上下方向に併設する場合で、**後続シールドが上を通過する場合には、その影響は比較的小さい。**後続シールドを下に施工する場合、上のトンネルには掘削に伴い、地盤の緩みに起因する鉛直荷重の増加や不同沈下が考えられる。このような場合には横断方向と併せて縦断方向の検討も必要になる。ただし、上下トンネルともに硬質地盤中に構築する場合、後続シールドを下に施工しても、上のトンネルにほとんど影響が生じなかった事例もある。

2)について 併設トンネルの相互干渉の影響はトンネル周辺地盤の土質によって異なり、とくに鋭敏比の高い軟弱地盤、自立性の乏しい砂地盤において顕著に現れる。このような場合は、地盤の緩みに関してとくに慎重な検討が必要である。また、地盤が良好な場合や地盤改良を行った場合においても、トンネルの離隔距離が小さい場合には、後続トンネルの推力等の影響が大きくなることが知られている。密閉型シールドを用いる場合にこの傾向が顕著であり、併設トンネルの検討にあたっては地盤と施工法との関連にも十分な注意が必要である。

3)について 先行トンネルへの影響は、後続トンネルの外径が大きいほど大きい。そのため、各トンネル外径

の影響についても留意して検討しておく必要がある。

4)について 後続トンネルの施工は、先行トンネルの施工後、地山が安定した後、または同時に行われることが望ましい。工事工程等の条件から十分な地山の安定のための時間を確保できない場合には、先行トンネルの掘削の影響が残っている状態で、後続トンネルが施工されることになる。このような場合は、1)で述べたようなトンネルの相互干渉の影響が顕著であるため、トンネル相互の施工時期についても十分な検討が必要である。

5)について 併設してトンネルを施工する場合、後続シールドが先行トンネルに与える影響はシールドの形式によって大きな差がある。トンネルを水平方向に併設する場合は、先行トンネルには、後続シールドの切羽が通過中に切羽圧や裏込め注入圧が過大な偏圧として作用する。このことは、過去に用いられた開放型シールドの場合に、切羽の開放による地山の緩みの影響を受けて一時的に側方土圧や地盤反力が減少した現象と対照的である。併設トンネルの施工時の影響を検討する場合には、周辺地盤の性質やトンネルの位置関係とあわせてシールド形式による挙動の差異についても留意して慎重に行う必要がある。

6)について 先行トンネルに影響を与える後続トンネルの施工時の荷重は主として泥水圧または泥土圧、裏込め注入圧、推力等の影響であるが、これらの荷重はトンネル間の土を介して先行トンネルに偏圧として作用し、横断方向および縦断方向に大きな変位や応力を発生させることがある。また、施工時荷重の影響は、後続トンネルの掘削による地山応力の再配分と同時に生じる場合が多いので、その定量的な評価には十分な注意が必要である。施工時の荷重によって覆工等の応力の検討を行う場合には、第2編 4.1に定める許容応力度を割増ししてもよい。許容応力度の割増しについては、第2編 4.2に示す留意事項を参照し適切な値を採用すべきである。

併設トンネルによる相互干渉の影響, 施工時の荷重の影響については, 地盤を平面ひずみ要素, 覆工をはり要素でモデル化し, 施工ステップを考慮した解析等によって評価される場合が多い. 他の手法としては, トンネルの掘削による周辺地盤の緩みを土圧係数の低減, 地盤反力係数の低減あるいは鉛直土圧の割増し等によって評価する方法もある. 併設トンネルの影響を検討する場合には, これらの評価手法も含め過去の研究, 実験, 計測結果等を参考にし, 安全性の確保を基本として適切な評価を行うことが重要である.

シールドトンネルの近接・併設の影響と設計検討手法(その1)

国土舘大学 教授 堀地 紀行

MIDAS

Session.2

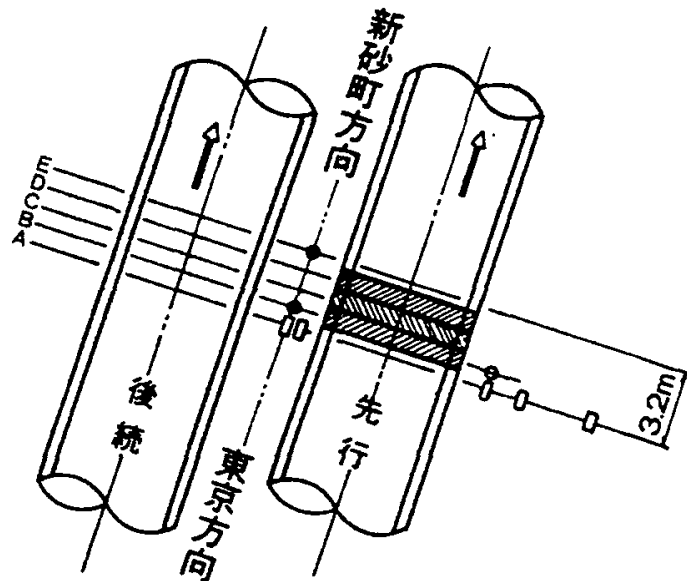
左右併設シールドの現場計測と 覆工の解析・検討

シールドトンネルの 近接・併設の影響と 設計検討手法(その1)

国土舘大学 教授
堀地 紀行

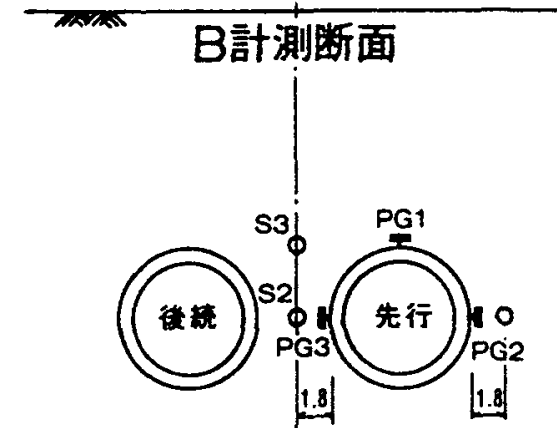
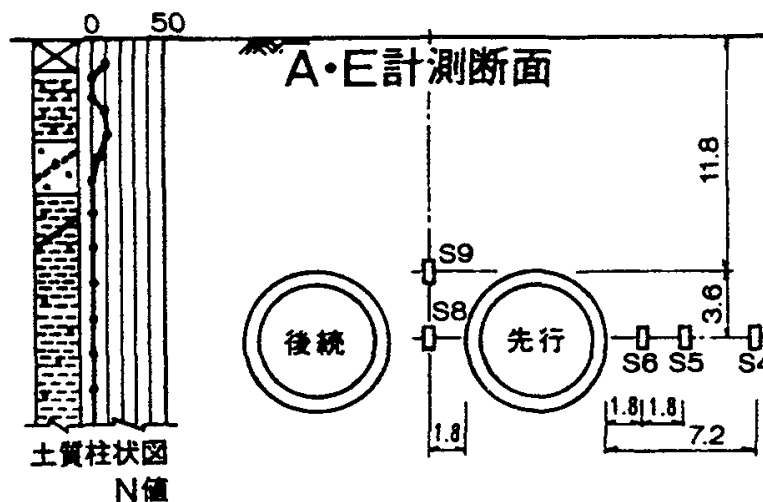
Session.2 左右併設シールド

現場計測概要図



凡例

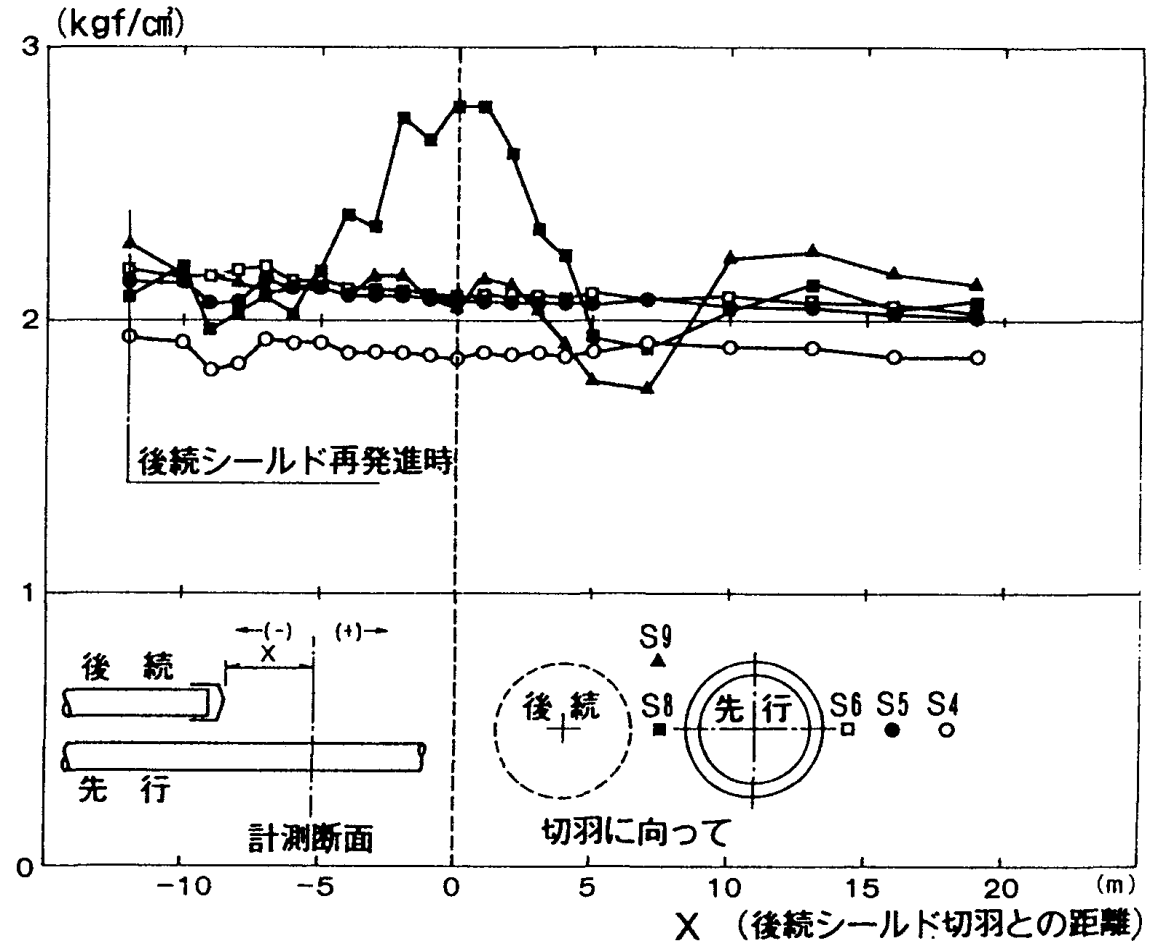
記号	計器名
□	地中土圧計(切羽直角方向)
○	地中土圧計(切羽方向)
T	土圧計(セグメント地山密着型)
■	土圧計(セグメント表面設置型)
—	鉄筋計



シールドトンネルの 近接・併設の影響と 設計検討手法(その1)

国土舘大学 教授
堀地 紀行

Session.2 左右併設シールド



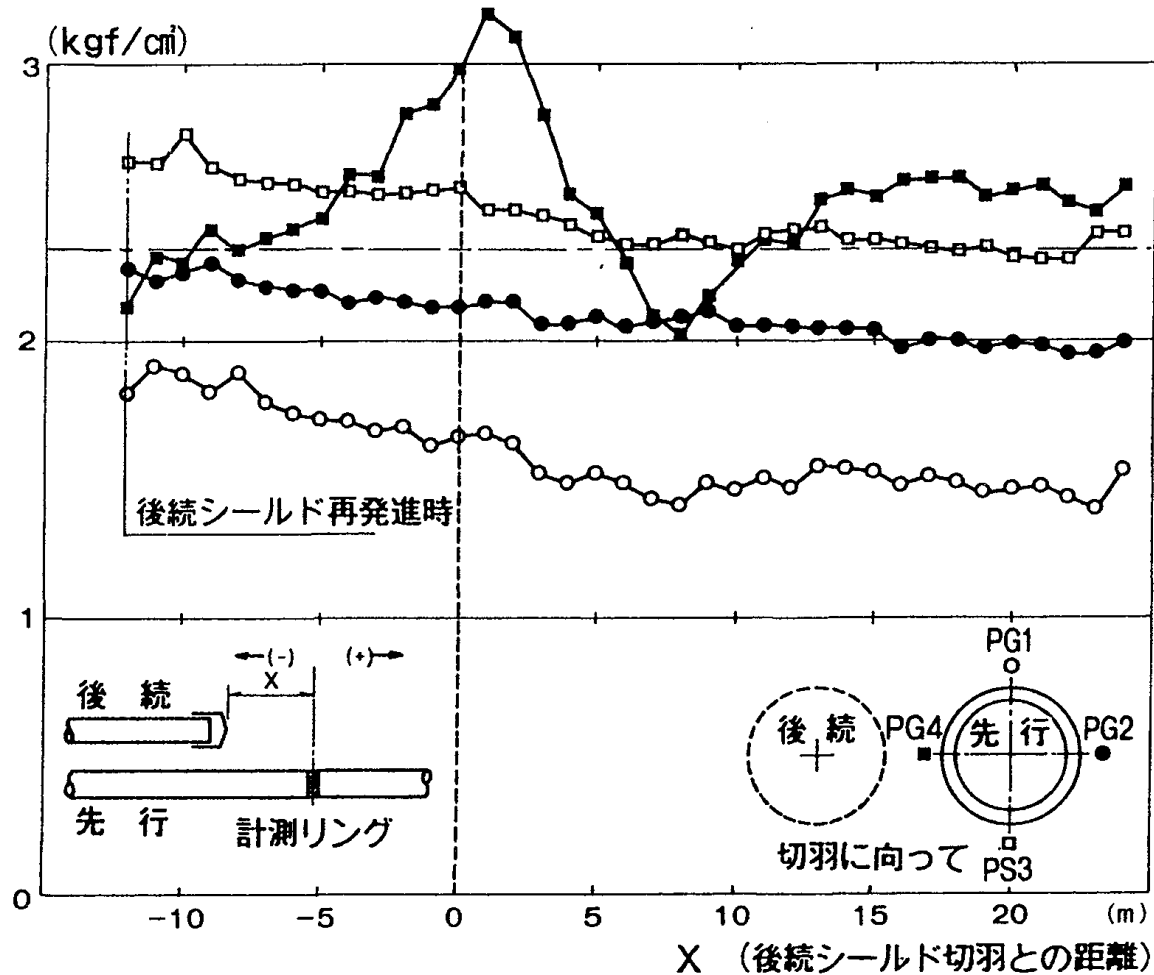
地中土圧計 (S) による後続シールドの影響

後続シールド掘進に伴う地中応力の変化

シールドトンネルの 近接・併設の影響と 設計検討手法(その1)

国土舘大学 教授
堀地 紀行

Session.2 左右併設シールド



地山密着型土圧計 (PG) による後続シールドの影響

先行トンネルに作用する負荷応力 (地山密着型)

シールドトンネルの 近接・併設の影響と 設計検討手法(その1)

国土舘大学 教授
堀地 紀行

Session.2 左右併設シールド

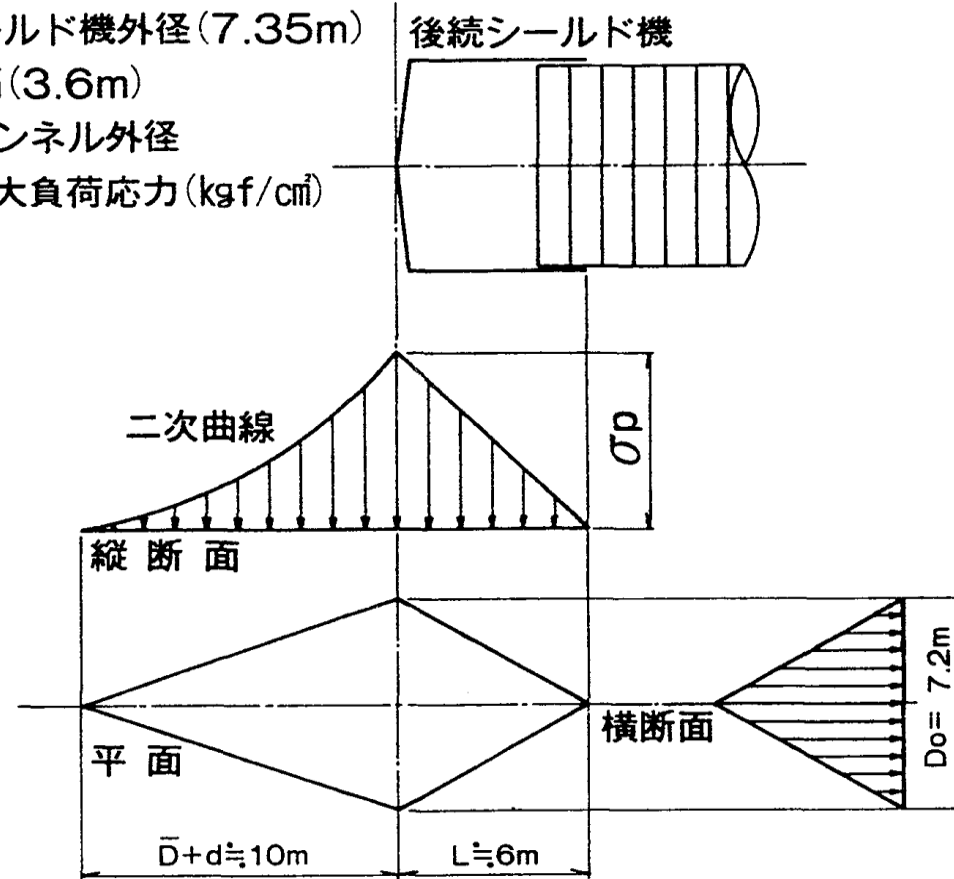
L : シールド機長 (6.4m)

\bar{D} : シールド機外径 (7.35m)

d : 離隔 (3.6m)

D_o : トンネル外径

σ_p : 最大負荷応力 (kgf/cm²)

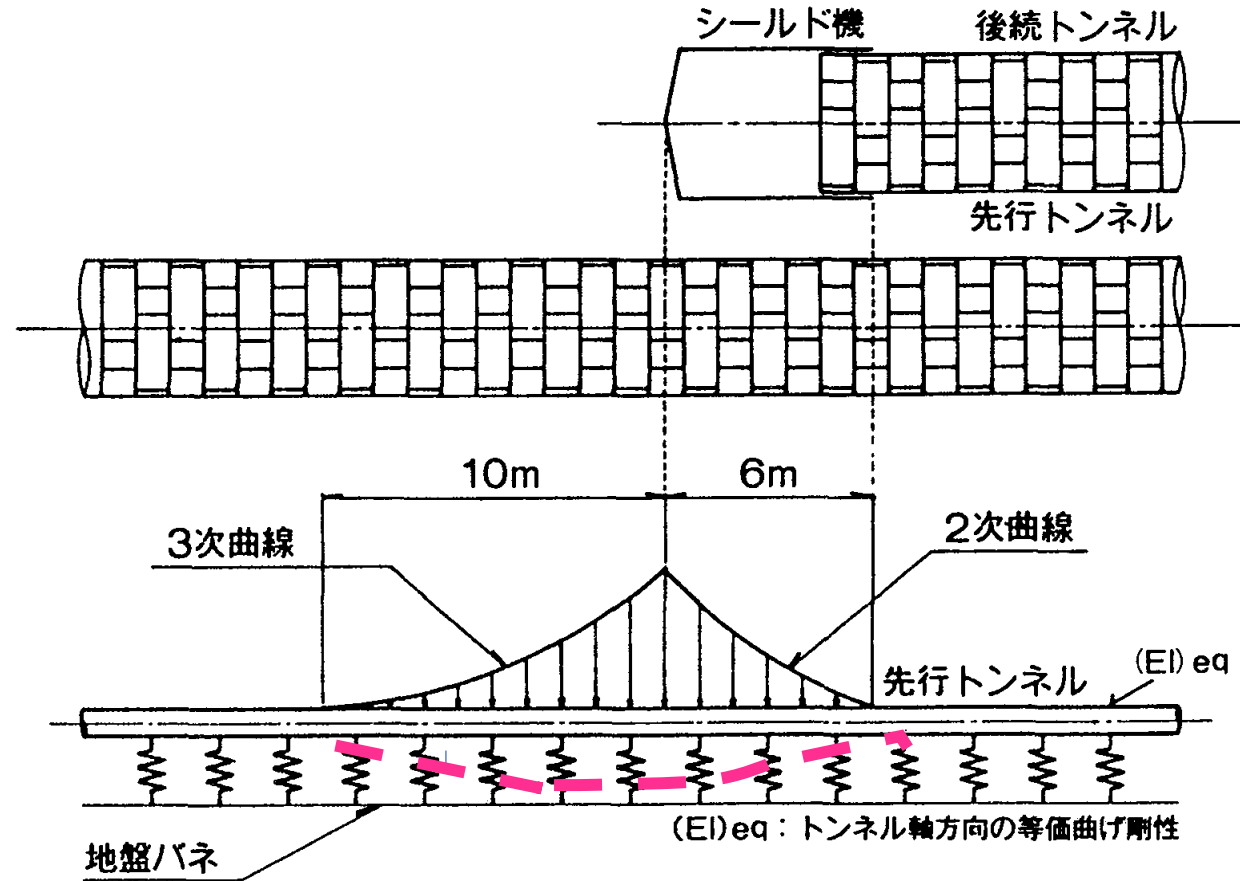


先行トンネル作用負荷土圧モデル

シールドトンネルの 近接・併設の影響と 設計検討手法(その1)

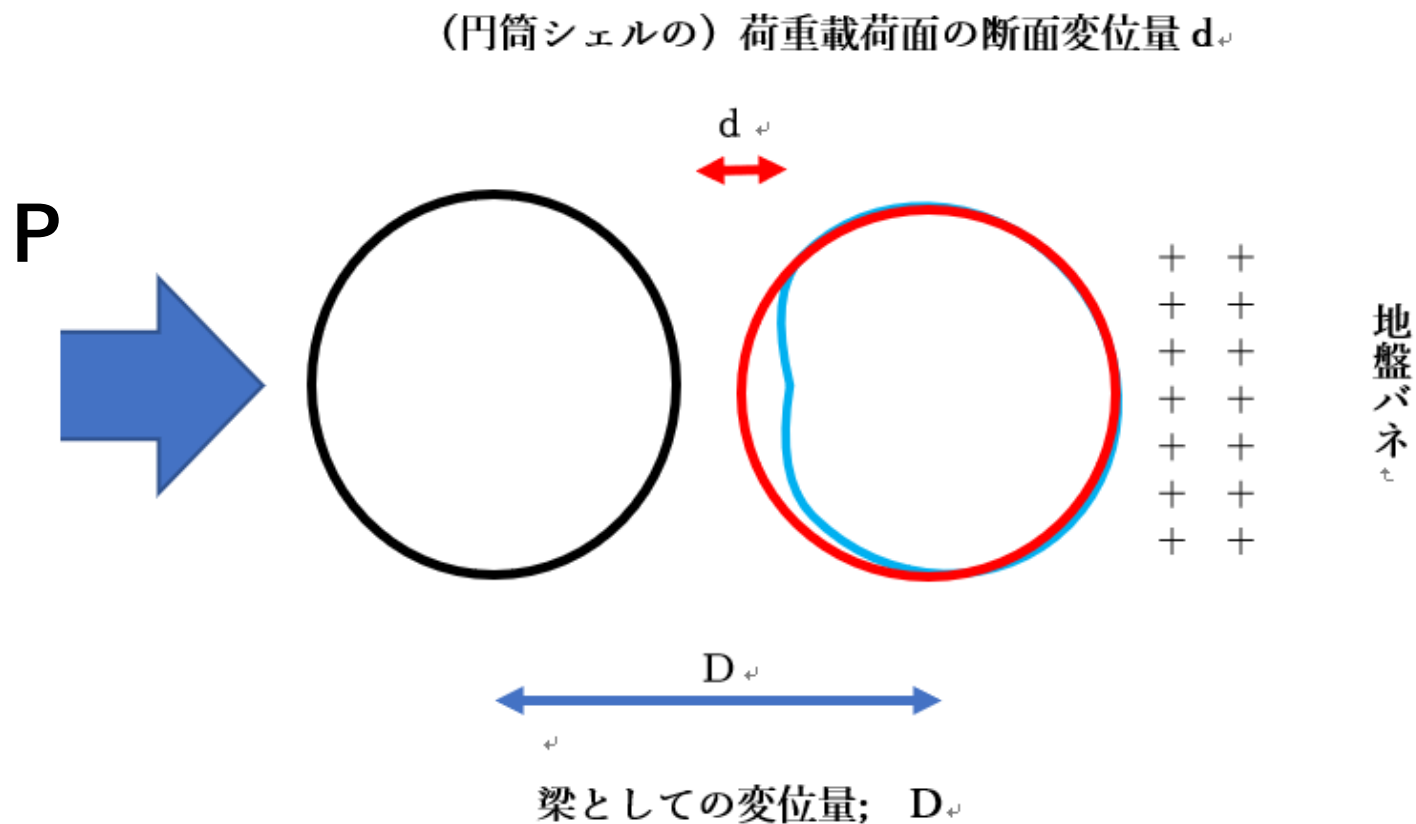
国土舘大学 教授
堀地 紀行

Session.2 左右併設シールド



先行トンネル弾性床はりモデル

(先行シールドトンネルの長手方向の検討から断面の検討へ)



シールドトンネルの長手方向（軸方向）の検討については、トンネルを等価剛性率を有する円環断面の梁と評価すると、既設トンネルは左右併設の場合、後続トンネルと反対側の側方土圧で支持された地盤を弾性床とみなすことで、弾性床上の梁としてモデル化でき、その梁に後続シールドの施工時時荷重を作用させることで、既設トンネルの長手方向に着目した変位や断面力が求められる。構造解析において要素の制限を設けなければ、既設トンネルのリング間継ぎ手を離散化して解析することも十分可能である。

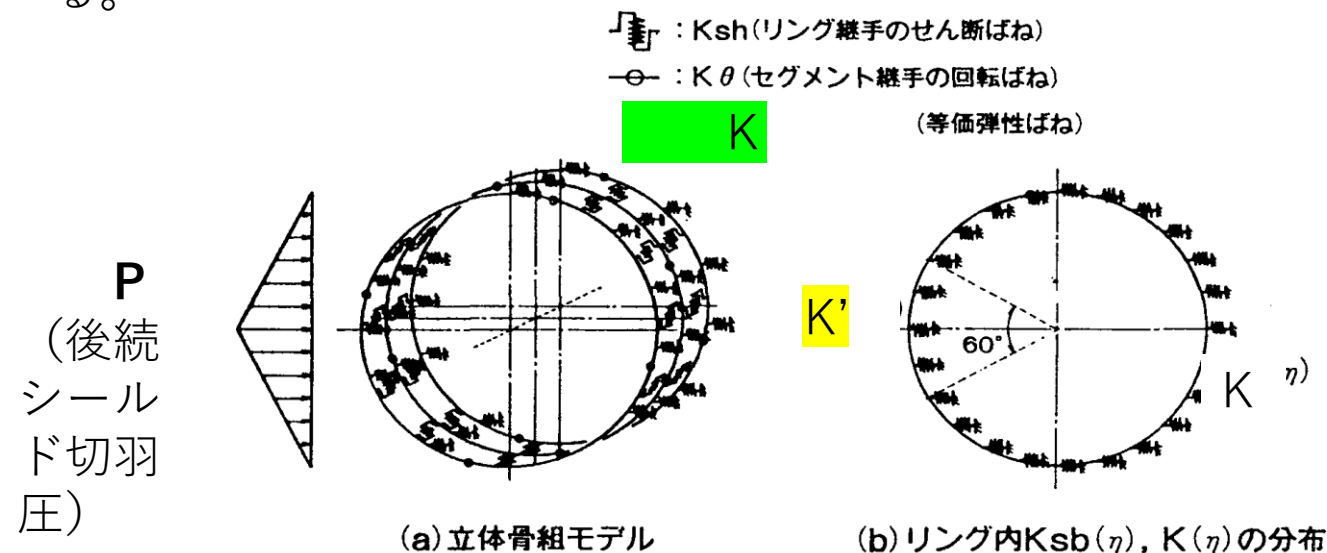
前頁の変位と荷重と関係から、既設シールドの長手方の構造的な特徴として断面は全体的に $P/D=k$ のばね定数のばねで支持されていると評価でき、一部の荷重載荷ゾーンの周辺は大きさ d の断面変形を生じるため、その付近のばね定数は $K'=P/(D+d)$ となる ($K>K'$)。そうしたトンネル長手方向の地盤条件と境界条件、トンネル剛性を評価したばねをセグメントリングの骨組み構造解析モデルに適用することで、後続シールドの切羽圧や蛇行時の外力を施工時の増加荷重として作用させることで、3次元構造的（擬似3次元構造）に既設トンネルの増加断面力を求めることができる。

シールドトンネルの 近接・併設の影響と 設計検討手法(その1)

国土舘大学 教授
堀地 紀行

Session.2 左右併設シールド

具体的には前頁の変位と荷重と関係から、既設シールドの長手方の構造的な特徴として断面は全体的に $P/D=K$ のばね定数のばねで支持されていると評価でき、一部の荷重荷重ゾーンの周辺は大きさ d の断面変形を生じるため、その付近のばね定数は $K'=P/(D+d)$ となる ($K>K'$)。こうして求めたばね定数のばねをシールドトンネルの梁ばねモデルに分散挿入して適用すると、長手方向のトンネル剛性と地盤の支持を3次元的 (擬似3次元) に評価した解析が実行できる。



疑似三次元骨組構造モデル (3リングモデル)

シールドトンネルの近接・併設の影響と設計検討手法(その1)

国土舘大学 教授 堀地 紀行

MIDAS

Session.3

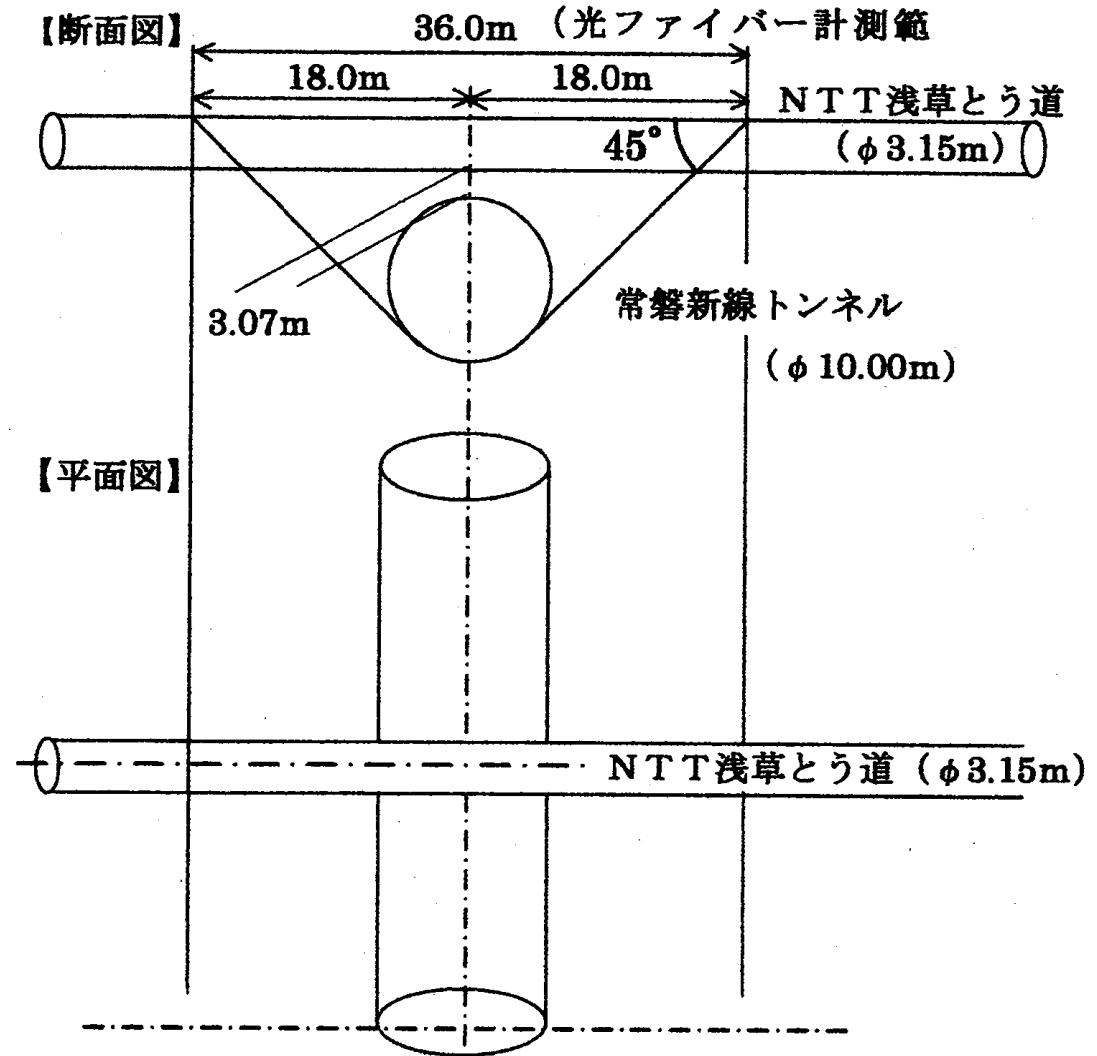
下部通過シールドの現場計測と 覆工の解析・検討

シールドトンネルの
近接・併設の影響と
設計検討手法(その1)

国土舘大学 教授
堀地 紀行

Session.3 下部通過シールド

概要図

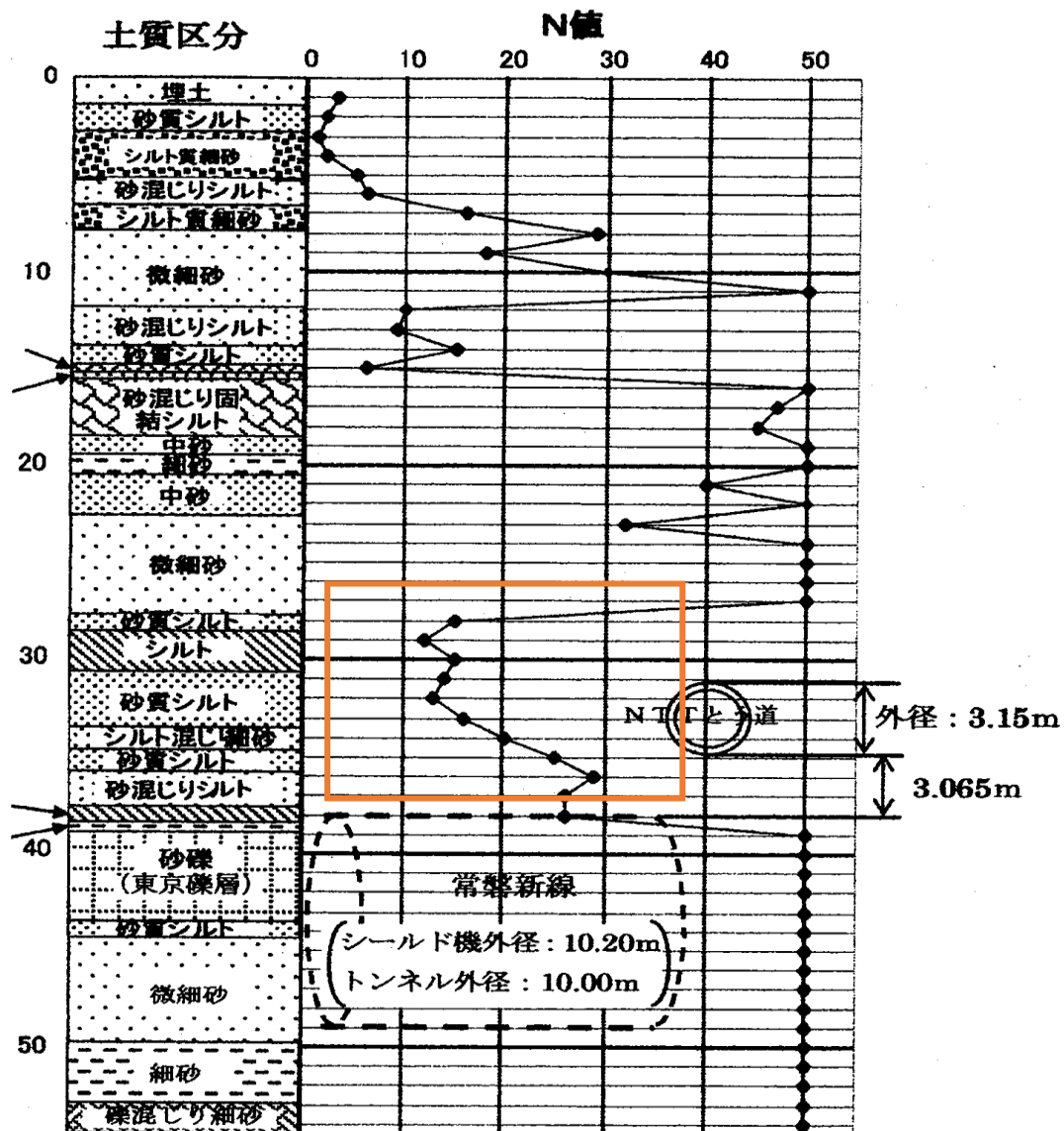


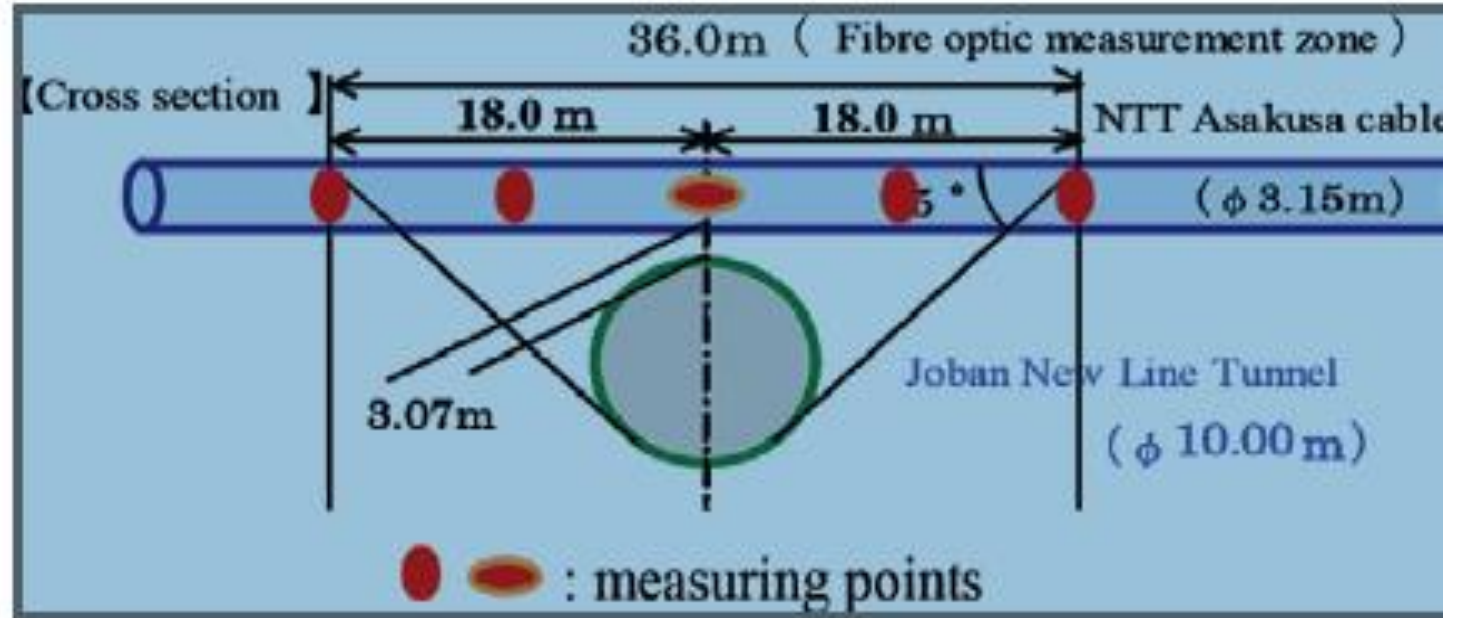
シールドトンネルの 近接・併設の影響と 設計検討手法(その1)

国土舘大学 教授
堀地 紀行

Session.3 下部通過シールド

地質縦断面図





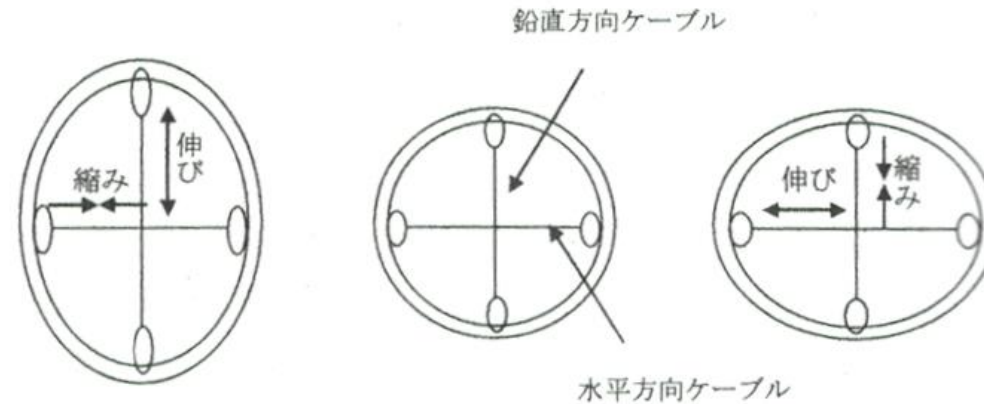
Positions of the two tunnels.

シールドトンネルの
近接・併設の影響と
設計検討手法(その1)

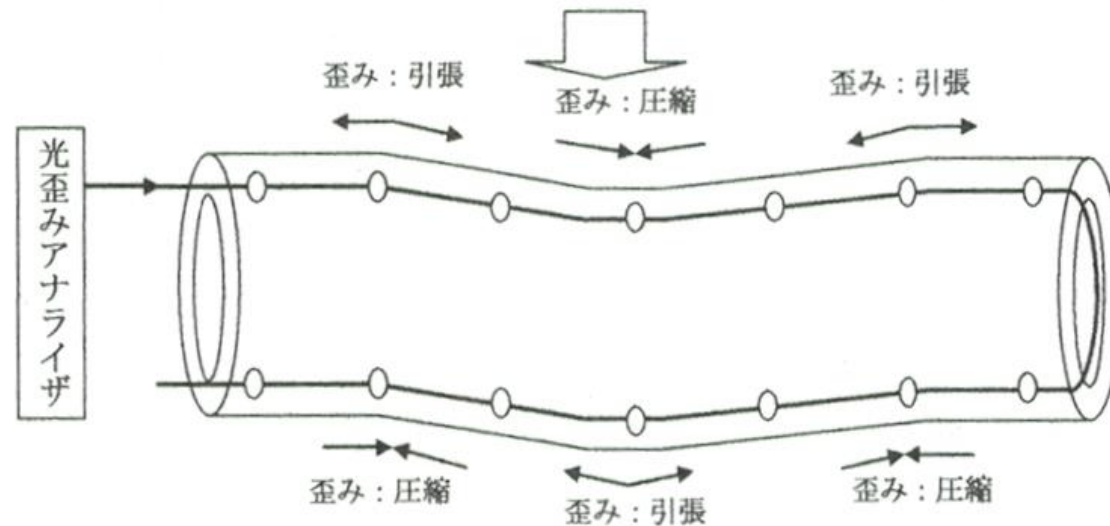
国土舘大学 教授
堀地 紀行

Session.3 下部通過シールド

BOTDR
光ケーブル計測



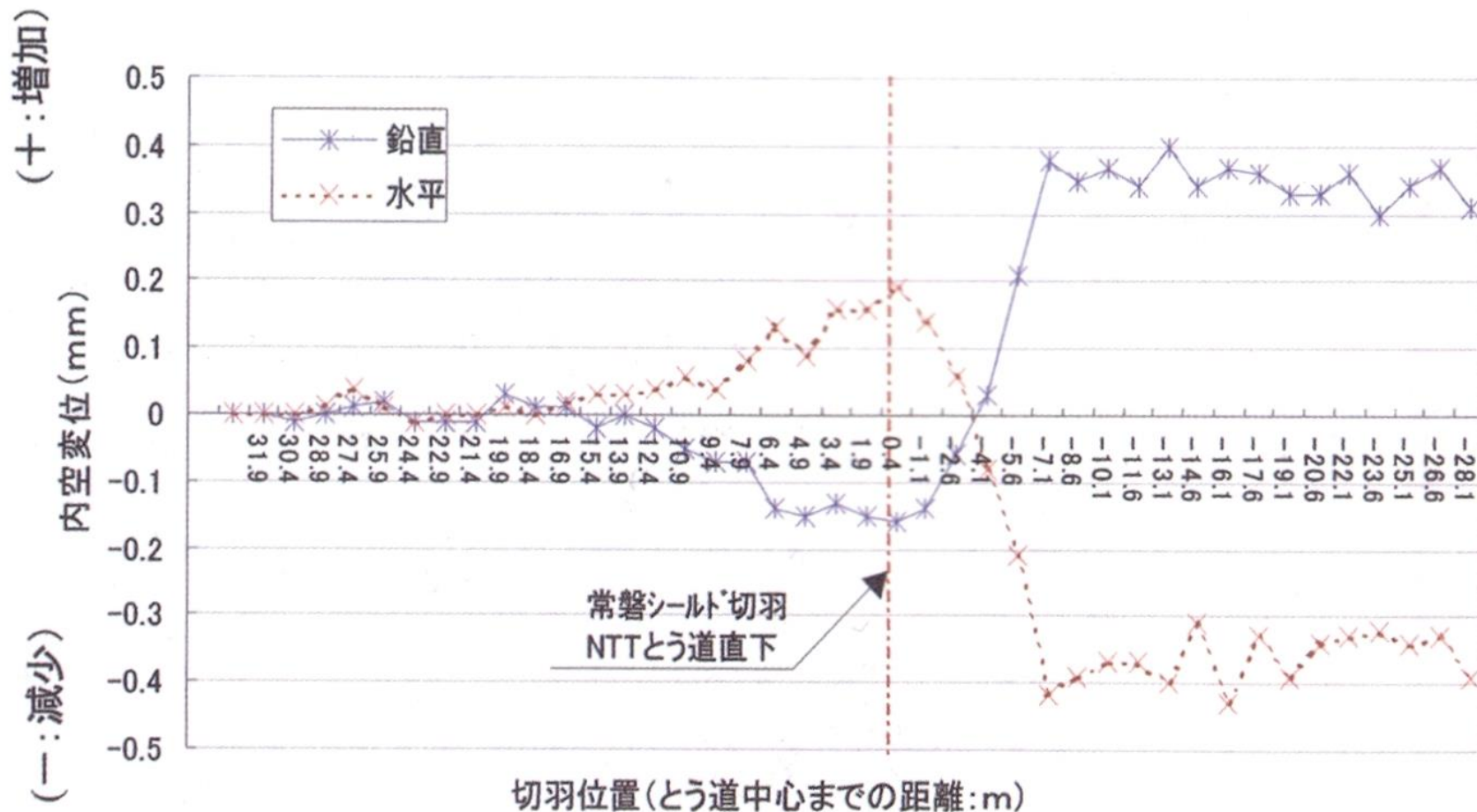
(a)内空変位計測

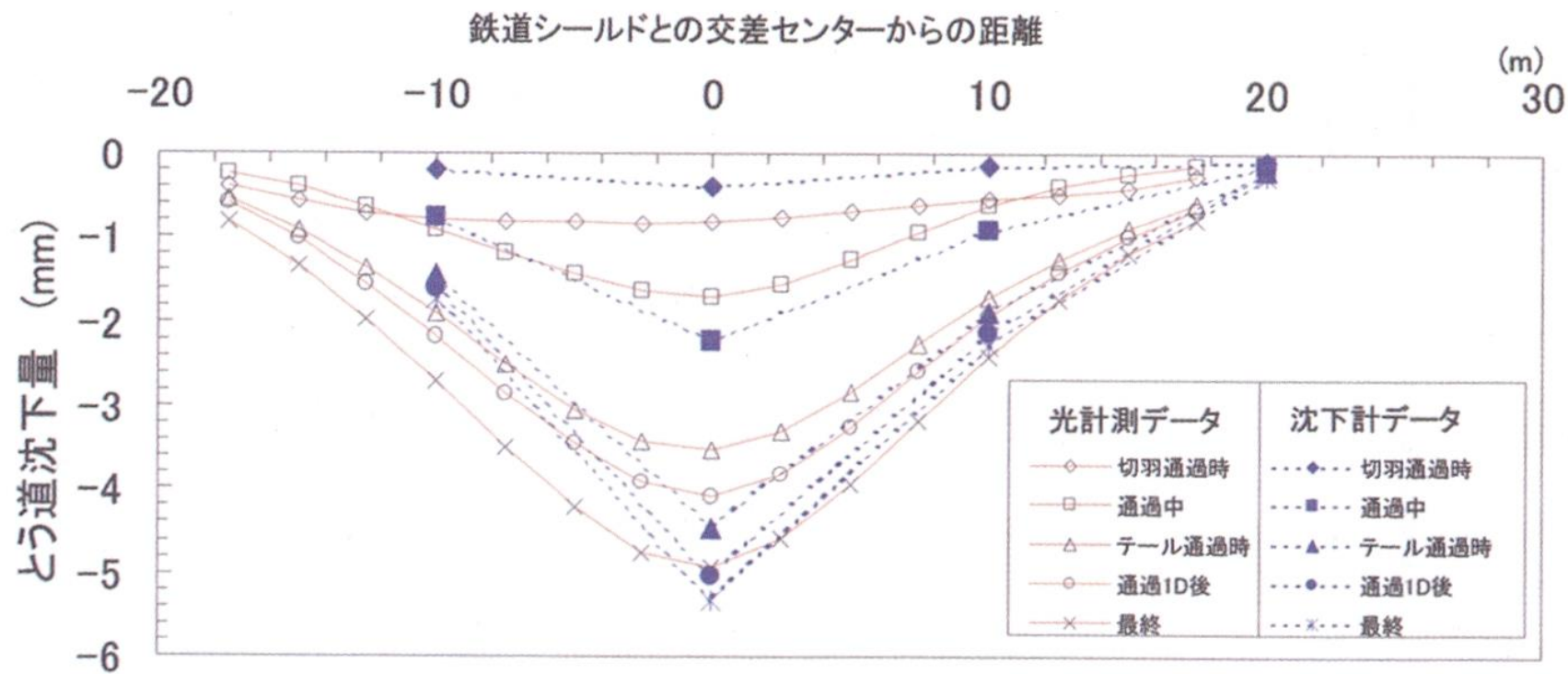


シールドトンネルの 近接・併設の影響と 設計検討手法(その1)


国土舘大学 教授
堀地 紀行

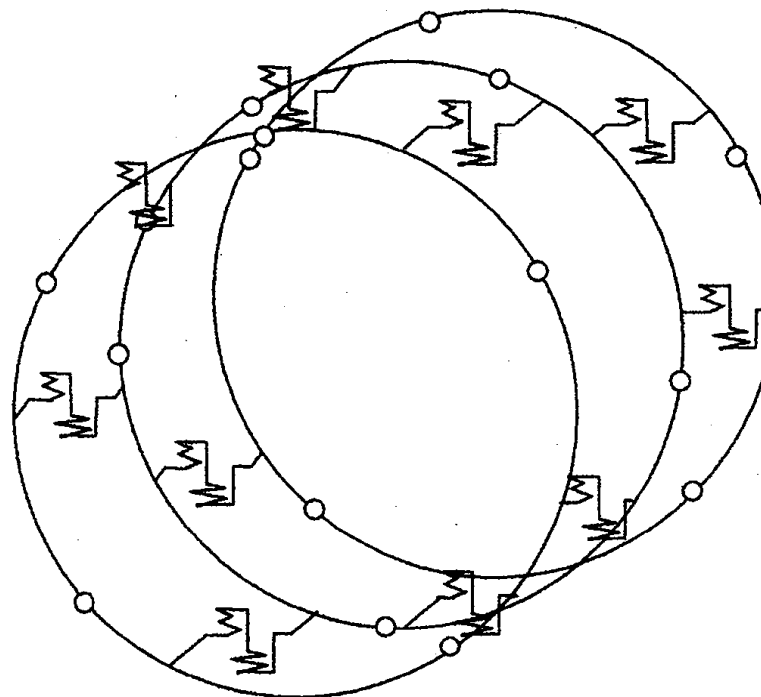
Session.3 下部通過シールド





—○— K θ :回転バネ (セグメント継手)

 Ksh:せん断 (リング継手)



後に示す、アンダーパス後の低減した地盤ばね定数をリング解析モデルの下半180度範囲にセットして当初の設計時荷重を入力すれば、アンダーパス後の断面力の変化が求められる。

2リング骨組解析モデル (全周地盤バネ付き)

アンダーパス施工の場合では、一般的なFEM解析のほかに、アンダーパス施工前後の既設トンネルの断面力の変化を求める方法として、セグメントリングの2リング骨組み構造モデルを用いる方法がある。

解析方法は、構造モデルの全周に配置した地盤ばねの定数をトンネル下半部分を低減させる方法である。下半部分の左右45度の範囲か、90度の範囲かは地盤によって異なるが、硬質地盤ではおおむね60度程度と考えられ、軟弱地盤の場合には左右90度近くの範囲を低減させることになる。

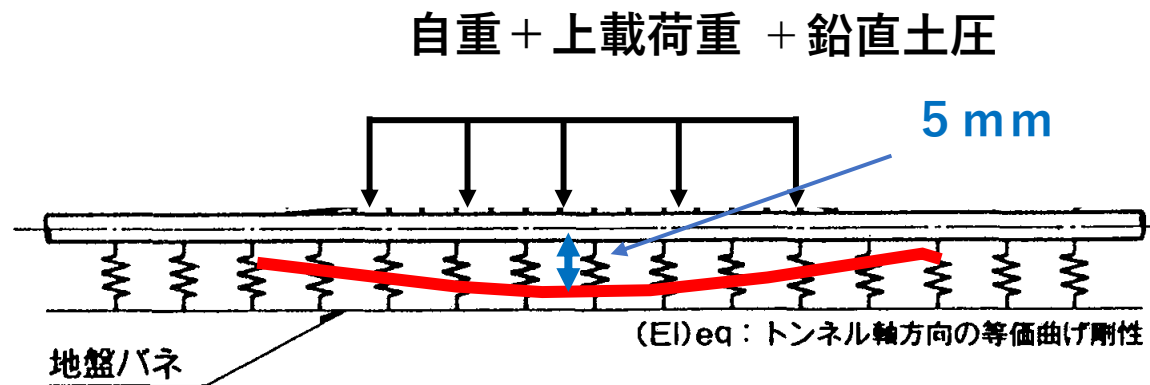
具体的な地盤のばね定数を低減は、

- (1) 既設トンネルの長手方向を等価剛性率で曲げ剛性を低減させた弾性床土上の梁とみなす。
- (2) 梁の自重と上載荷重を下向き荷重として選ぶ。
- (3) 荷重の載荷範囲はアンダーパスの影響範囲（影響範囲外はトンネルに作用する荷重は鉛直方向について上下に釣り合っているため考慮しない）とする。
- (4) 弾性床土上の梁の鉛直変位は、今回の計測例では、影響範囲の中心で5mmである。初期値をゼロアジャストして同じ荷重状態で、影響範囲の地盤のばね定数を低減させて同じ5mmの地下を生じさせるばね定数を反復計算で求める。
- (5) その値を骨組み構造モデルに挿入して、シールドの面力解析を行うことで、アンダーパス後の既設トンネルの断面力の増分変化を求めることができる。

シールドトンネルの 近接・併設の影響と 設計検討手法(その1)

国土舘大学 教授
堀地 紀行

Session.3 下部通過シールド



荷重を一定に保ち、後続シールドアンダーパスの影響範囲の地盤ばね定数を、逐次計算で低減させて、沈下量 5 mm と一致させれば、通過後の地盤ばね定数が求まる。

先行トンネル弾性床はりモデル

「シールドの下部通過により5 mm低下した」という計測結果から、初期値をゼロアジャストして同じ荷重・境界条件で、影響範囲（今回の事例では、既設トンネルの左右20 m程度）の地盤のばね定数を低減させて同じ5 mmの沈下を生じさせる。なお、ばね定数は反復計算で求められる。その際に発生している既設トンネルの長手方向の断面力が求める断面力となる。

シールドトンネルの近接・併設の影響と設計検討手法(その1)

国土舘大学 教授 堀地 紀行

MIDAS

Session.4

まとめ

(1) この講演では、初めに土木学会トンネル標準仕方書（シールド編）を確認し、左右併設シールドトンネルと下部通過（アンダーパス）の2ケースについて実際の計測事例を示して現象を説明しました。

(2) さらに、左右併設シールドでは、先行シールドに作用する切羽圧を荷重と評価して、構造モデルに作用させて増加断面力を求める方法を説明しました。

(3) また、下部通過（アンダーパス）のケースでは新設トンネルによって地盤反力が低下する場合の既設トンネルの断面力の変化の解析手法を説明しました。

近接・併設シールドの場合、多くは施工時の一時的な荷重の変化（施工時荷重）や地盤の変化として捉えられ、その解析結果は、設計上、許容応力度の割増として対処可能となります。しかしながら、荷重や地盤性状の変化が恒常的となる場合もあり、こうした場合が予想される工事では、洞察的な判断で当初より計測やモニタリングを実施して、長期的な観測データの分析を基に、補強対策を実施することとなります。

近接・併設施工では、荷重や地盤性状の変化から既設トンネルの状況を把握する予測解析は必須で、そのための荷重の大きさや形状、地盤の変化を的確に適用する必要があります。文献資料や、データ収集、さらには現場での計測・モニタリングなどが求められます。

次の講演では、既設トンネルに対し、上下に大断面シールドが施工されたケースを取り上げ、計測結果の分析と、その現象を再現したFEM逐次掘削解析について説明します。

次ページにこの講演の参考文献を記載します。

シールドトンネルの 近接・併設の影響と 設計検討手法(その1)

国土舘大学 教授
堀地 紀行

Session.4 まとめ (参考文献)

34

堀地紀行,平嶋政治,松下芳亮,石井恒生:軟弱粘性土地盤における併設シールドトンネルの現場計測とセグメントリングの疑似三次元構造解析モデル,土木学会論文集, 第418号/III-13,pp.195-204,1990,6.

奥要治,堀地紀行,小泉淳,平岡慎雄:光ファイバーケーブルによるシールド近接交差計測と既設トンネルの断面力解析,トンネル工学論文集第15巻/pp.107-114. 2005,12.

シールドトンネルの近接・併設の影響と設計検討手法(その1)

国土舘大学 教授 堀地 紀行

MIDAS

**ご清聴
ありがとうございました**