

# 併設される複数のシールドに作用する荷重に関する基礎的研究

## A fundamental study on the load acting on plural adjacent shield tunnels

鈴木正彦<sup>1)</sup>、真下英人<sup>1)</sup>、山本雅広<sup>2)</sup>

Masahiko SUZUKI, Hideto MASHIMO and Masahiro YAMAMOTO

A new shield tunnel method, which excavates the outside of a tunnel using small section shield machines at first and then excavates the inside, has been developed.

To adopt this tunnel method, it is necessary to evaluate the earth pressure appropriately acting on the outside tunnels which interfere mutually.

The author carried out a fundamental model test to clarify the mutual influence due to the adjacent excavation near to the existed tunnel.

**Key Words:** model test, earth pressure, adjacent tunnel, mutual influence

### 1. はじめに

自由な断面形状の大断面トンネルを構築できる工法として、複数の小断面シールドを自由に組み合わせトンネルの外周部を構築した後、内部の土砂を取り除いてトンネルを掘削する工法(外郭先行掘削シールド工法)の検討が進められている。この工法によりトンネルを掘削する場合には、複数の小断面シールドが併設されるために相互のトンネルが干渉し、その結果、トンネル掘削に伴って発生するトンネル周辺地盤の緩みがトンネルを全断面により掘削した場合は異なったものとなることが考えられるため、トンネルに作用する荷重の評価方法が設計上の大きな課題となる。

本研究では、段階的に発生する緩みがトンネルに作用する荷重に及ぼす影響を明らかにすることを目的として、基礎的な模型実験を行った。

### 2. 掘削手法のモデル化

本研究では、複数の小断面トンネルにより外郭部を先行掘削し、トンネルを構築する際に発生する段階的な緩みがトンネルに作用する荷重に及ぼす影響に着目しているため、外郭先行掘削シールド工法の掘削過程において発生する緩みに関し、図-1に示すようなモデル化を行った。

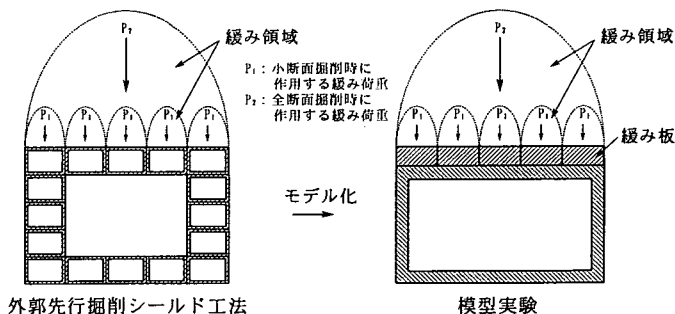


図-1 外郭先行掘削シールド工法のモデル化

1) 正会員 建設省土木研究所 道路部トンネル研究室

2) 正会員 中央復建コンサルタンツ株式会社(元土木研究所 交流研究員)

### 3. 実験方法

図-2は、実験装置の概要を示したものである。実験土槽は、高さ2150×幅1200×奥行き460mmの鋼製枠に前後面に透明なアクリル板を取り付けたものを使用した。

トンネル模型は、高さ100×幅300×奥行き460×板厚10mmの鋼製の矩形模型で模型上面には、荷重計設置用の溝(幅15×長さ300×深さ6mm)が等間隔に5箇所設けられている。

実験は、トンネル模型の上部に幅60×長さ460×厚さ10mmの緩み板を5枚設置し、気乾状態の豊浦標準砂(単位体積重量 $\gamma=1.50\text{gf/cm}^3$ 、含水比 $W=0.48\%$ 、内部摩擦角 $\phi=36^\circ$ )を模型上部から投入して地盤を作成した後、緩み板を引抜くことによりトンネル模型周辺地盤に緩みを発生させてトンネル模型に作用する土圧および模型周辺地山の変位を計測した。

トンネルに作用する土圧は、緩み板を引抜いたときにトンネルに作用する荷重をトンネル模型に設置

した受圧板を介してトンネル模型上面の溝に設置された4個の荷重計(定格負荷:5kgf)で計測し、その各値を合計して受圧板の面積( $=38.5\text{cm}^2$ )で除することにより求めた。また、地中変位は、実験土槽のアクリル板側面に接して地中に標点を3cm×3cmの格子状に埋め込み、緩み板を引抜いた後の評点の動きを写真に撮り、写真から標点の変位量を求めた。

実験は、土被り比 $H/D$ ( $H$ :土被り、 $D$ :トンネル模型幅)を0.5、1、2に対して、緩み板の引抜き順序を、表-1に示す6通りに変化させた。

### 4. 実験結果

#### 4.1 トンネル模型全体に作用する荷重

図-4は、緩み板を全て引抜いた段階でのトンネル模型全体に作用する荷重を各土被りに対して示したものである。トンネル模型全体に作用する荷重は、各緩み板の位置における土圧の値に緩み板1枚の面積( $=276\text{cm}^2$ )を乗じ5箇所の合計として求めた。また、グラフ中には理論値として全土被り荷重とTerzaghiの緩み土圧を算定する次式において、 $B$ の値にトンネル模型の幅( $=30\text{cm}$ )を採用した時の土圧にトンネル模型面積( $=1380\text{cm}^2$ )を乗じたものを併せて示した。

$$q=B(\gamma-2c/B)\cdot\{1-\exp(-2HK\tan\phi/B)\}/(2K\tan\phi) \quad \cdots\cdots(1)$$

ただし、 $\gamma=1.5\text{gf/cm}^3$ 、 $c=0\text{gf/cm}^2$ 、 $\phi=36^\circ$ 、 $K=1$

土被り比0.5では、緩みの発生順序が異なることによるトンネル作用荷重に大きな差は見られず、すべてのケースがほぼ全土被り荷重と等しくなった。これは、土被り比が小さいためアチが形成されることなく緩み領域が地表面まで達し、全土被り荷重が作用したためと考えられる。

土被り比1では、すべてのケースで全土被り荷重とTerzaghiの緩み荷重のほぼ中間の値を示していることが

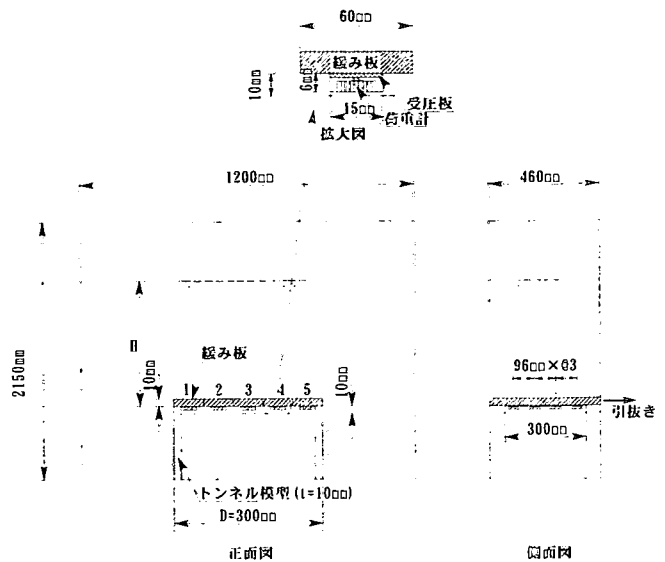


図-2 実験装置概要図

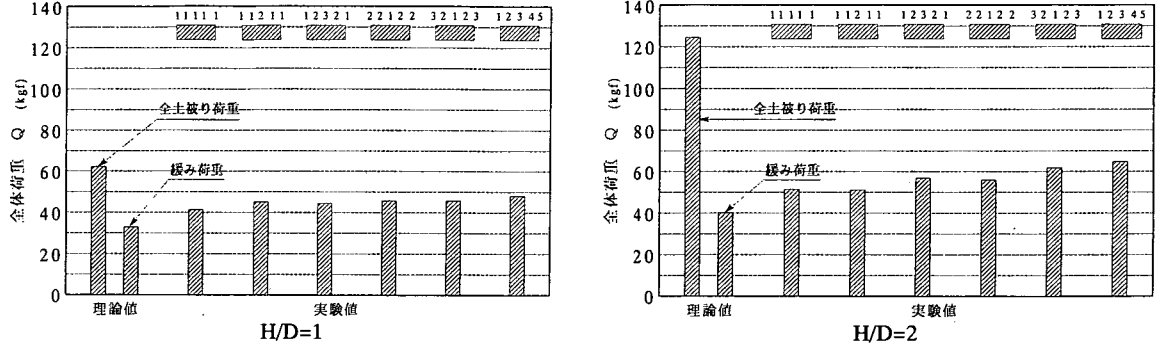
表-1 実験一覧

| ケースNO. |   |   |   |   |   |
|--------|---|---|---|---|---|
| 1      | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2      | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 |
| 3      | 1 | 2 | 3 | 2 | 1 |
| 4      | 2 | 2 | 1 | 2 | 2 |
| 5      | 3 | 2 | 1 | 2 | 3 |
| 6      | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |

表中の数字は引き抜き順序

ら、緩み領域が発生していると考察される。緩みを段階的に与えることの影響については、ケース1の一斉引抜きの場合は、他のケースに比べ若干ではあるが小さな値を示すことから、他の引抜き順序よりは緩み領域が小さくなっていると考えられる。

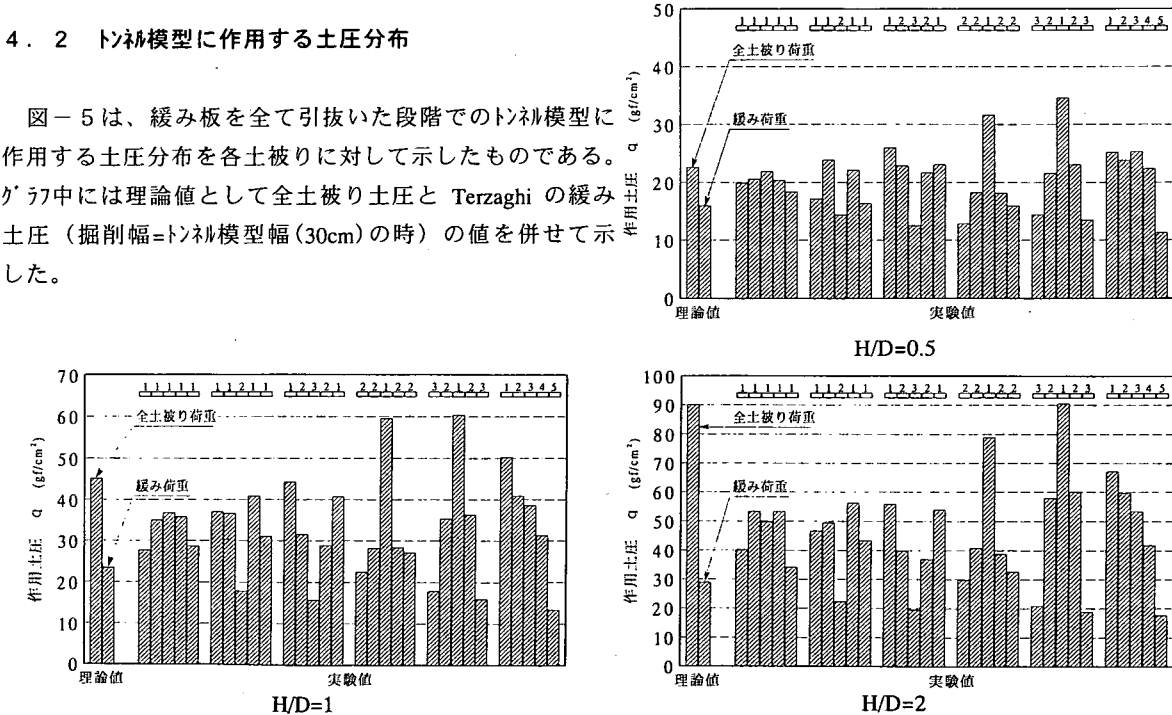
土被り比 2 では、すべてのケースにおいて Terzaghi の緩み荷重に近づく傾向があるため、 $\gamma$ - $z$ の形成がより促進されたと考察される。緩みの発生順序の違いについては、最小荷重を示したケース1及びケース2と最大荷重を示したケース6では、10kgf の差が認められることから、段階的に緩みを与えた場合の方が、一斉に緩みを与えた場合よりもトンネルには大きな荷重が作用すると言える。



図－4 トンネル模型全体に作用する荷重

#### 4. 2 トンネル模型に作用する土圧分布

図－5は、緩み板を全て引抜いた段階でのトンネル模型に作用する土圧分布を各土被りに対して示したものである。グラフ中には理論値として全土被り土圧と Terzaghi の緩み土圧（掘削幅＝トンネル模型幅（30cm）の時）の値を併せて示した。



図－5 トンネル模型に作用する土圧分布

一斉に緩みを与えるケース 1 では、土圧の分布形状は土被り比 0.5 の場合、全土被り土圧とほぼ等しい等分布に近い形状となり、土被りが大きくなるにつれて中央の土圧が全土被り土圧と作用土圧の中間値を示し、両端が緩み土圧に近づく山形の形状を示した。

段階的に緩みを与えるケースでは、先行引抜きをした部分に土圧が集中する傾向が見られ、特に、中央部から先行引抜きを行ったケース 4 および 5 の場合は、土被り比 0.5 と 1 で全土被り土圧を越える土圧がトンネル中央に作用し、土被り比 2 の場合においても、ほぼ全土被り土圧に等しい土圧がトンネル中央に作用することが分かる。また、左端から段階的に緩みを与えたケース 6 では、土被り比により土圧の分布形状は異なり、土被り比 0.5 の場合、最後に緩ませた右端を除いて、ほぼ等分布に近い形状を示し、土被り比 1 および 2 では最初に引抜いた左端から階段状に小さくなる形状を示した。また、作用土圧の最大値は、土被り比 0.5 および 1 で全土被り土圧を越える土圧が作用し、土被り比 2 で全土被り土圧と緩み土圧の中間の値を示した。このように、緩みの与え方によってトンネルに作用する土圧は大きく異なり、特にトンネル中央から掘削を行う場合には全土被り土圧を越えることがあるため、施工手順を十分考慮する必要がある。

#### 4. 3 各緩み板引抜き順序毎の作用土圧分布

図-6 は、左側から段階的に緩みを与えたケース 6 における引抜き順序毎の段階的な作用土圧の分布を示したものである。どの土被り比の場合も段階的に緩みを与えることにより、先に引抜いた左側の土圧が増加する傾向にあるがその影響範囲は土被り比によって異なる結果となった。

土被り比 0.5 の場合、一枚の緩み板を引抜くことにより地山に与える影響範囲は、引抜きを行った緩み板に対して 2 枚左側の部分土圧までが増加しているが 3 枚目の部分以降は増加していない。このことから、1 枚の緩み板を引抜くことによる影響範囲は、緩み板 3 枚分程度であることがわかる。

土被り比 2 の場合、最後の緩み板を引抜いても左端の緩み板はまだ増加の傾向を示すことから 1 枚の緩み板を引抜くことによる影響範囲は緩み板 5 枚分以上であることがわかる。

土被り比 1 の場合、一枚の緩み板が影響を及ぼす範囲は土被り比 0.5 と 2 の中間程度であり、影響範囲は 4 枚程度であった。これらのことより 1 枚の緩み板を引抜くことにより発生する緩み領域は、土被り比が大きな場合は広範囲に影響し、土被り比が小さな場合は地表面まで緩み領域が達してしまうため横方向への影響範囲は小さくなると考えられる。

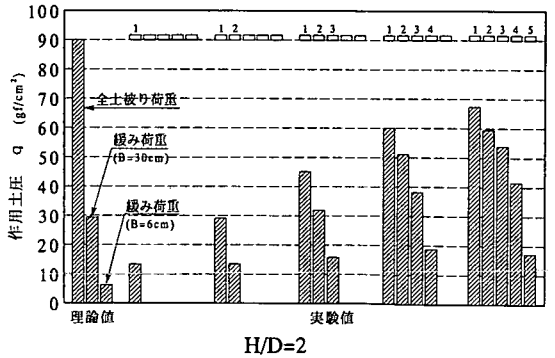
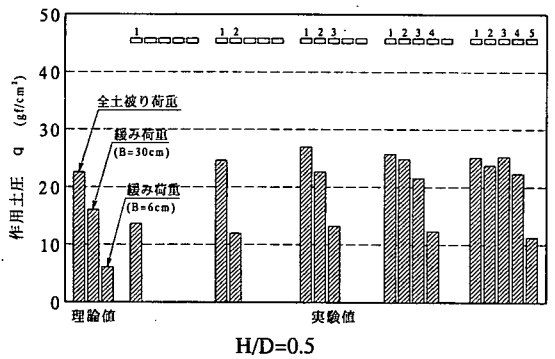
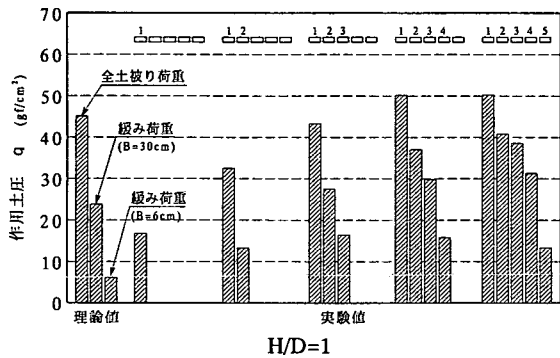


図-6 各緩み板の引抜き直後の土圧分布

4. 4 地山のひずみ分布

図-7は、各土被り比における一斉に緩みを与えるケース1と左側から段階的に緩みを与えるケース6について、全ての緩み板を引抜いた段階での最大せん断ひずみ分布を示したものである。ただし、最大せん断ひずみ分布は標点により形成される三角形要素内でのひずみが一定であるとの仮定のもとで、得られた変位から求めた。

土被り比 0.5 の場合、緩みの発生パターンに関係なく最大せん断ひずみの集中領域が両端の緩み板付近に発生し、その形状は地表面まで達していることから、アーチが形成されていないものと考えられる。このことは 4.1 で論じた、トレ全体に作用する荷重の値は全土被り荷重と比較的等しくなるという結果とも一致する。

土被り比 1 の場合、全ての緩み板を引抜いた段階では最大せん断ひずみの集中領域は、段階的に緩みを与えた場合も一斉に与えた場合と同様両端の緩み板の直上に発生し、大きさは若干異なるものの、形状自体はほとんど変わらない。また、土被り比 2 の場合も全ての緩み板を引抜いた段階での最大せん断ひずみの集中領域は他の土被り比の場合と同様にどちらのケースも両端の緩み板の直上に発生し、前述したようなトレに作用する荷重の差を説明できるだけの明らかな違いは分布形状には認められない。

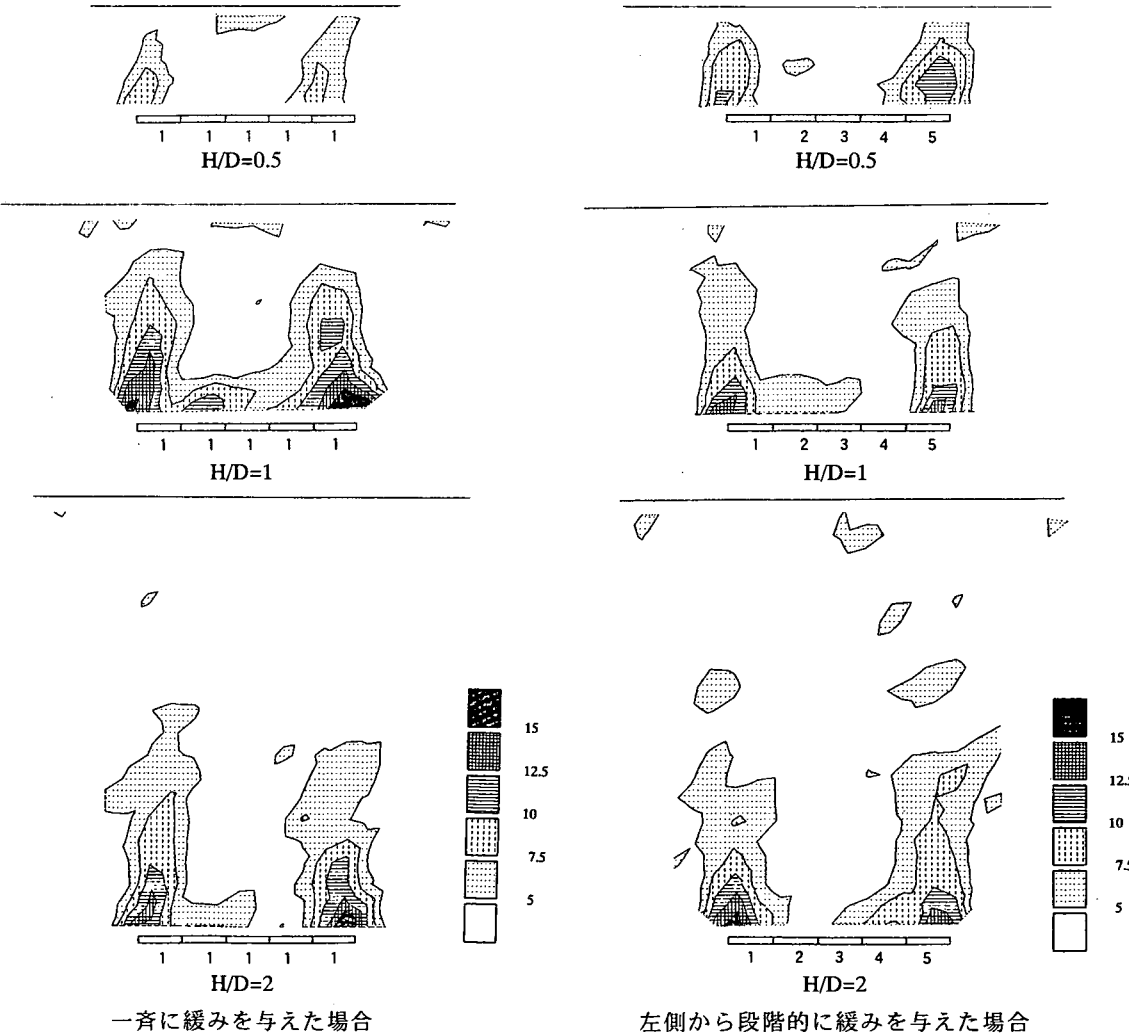


図-7 最大せん断ひずみ分布

## 5. 結論

本研究は、小断面のシールドを組み合わせて大断面トンネルを構築する工法（外郭先行掘削シールドトンネル工法）を用いた場合のトンネルに作用する荷重に関する基礎的な研究として模型実験を実施してきた。本研究で得られた主な成果をまとめると、以下ようになる。

1) トンネル模型全体に作用する荷重は、土被り比 0.5 の場合は緩みの発生順序による違いは現れないが、土被り比が大きくなった場合は緩みが段階的に発生することで若干の差を生じ、一斉に緩みを与えた場合よりも段階的に緩みを与えた方が大きな荷重がトンネルに作用する。また、トンネル模型全体に作用する荷重の大きさは、土被り比 0.5 の場合は全土被り荷重とほぼ等しくなり、土被り比 1 および 2 の場合は全土被り荷重と緩み荷重の中間の値を示した。

2) 緩みを全て与えた段階における各緩み板に作用する土圧分布形状は、緩みの発生順序により異なり、特に中央から緩みを与えた場合では土被り比 0.5 および 1 でトンネル中央に全土被り土圧以上の土圧が作用しており、土被り比 2 の場合においても全土被り土圧とほぼ等しい土圧が作用した。このように、緩みの与え方によってはトンネルに作用する土圧が大きくなるため施工手順は十分に考慮する必要がある。

3) 最大せん断ひずみの分布形状に関しては、緩みを一斉に与えた場合も段階的に与えた場合も最終的には両端の緩み板の直上付近に集中領域が発生し、緩みを段階的に与えることによる差は何れの土被り比の場合も明確には認められなかった。

## 6. おわりに

今回、緩みの与え方によるトンネル模型に作用する土圧および地中の変位について検討を行った。トンネルに作用する荷重に関しては、土被り比が 2 の場合は、緩みを段階的に与えた場合の方が一斉に緩みを与えた場合よりも大きくなる結果が得られたが地中の変位から求めた最大ひずみの分布形状からは明確な差を確認することができなかった。今後、地表面の沈下等の計測および数値解析等により現象を明らかにしていきたい。