

砂質地盤における鉛直併設矩形シールドトンネルの 作用土圧に関する遠心載荷実験

CENTRIFUGAL MODEL TEST FOR EVALUATION OF EARTH PRESSURE ACTING ON VERTICALLY ADJACENT BOXY SHIELD TUNNELS IN THE SANDY SOIL

小笠原 政文¹⁾・船本 浩二¹⁾・藤井 義文²⁾・平井 卓²⁾・野村 成樹²⁾

Masafumi OGASAWARA, Kouji FUNAMOTO, Yoshifumi FUJII, Takashi HIRAI and Shigeki NOMURA

The objective of this paper is to evaluate the mutual influence of constructing adjacent boxy tunnels in the sandy soil using centrifugal model test. In the case two boxy tunnels are constructed very closely and the lower tunnel of these tunnels is first constructed, it is appeared that the earth pressure acting on the side face of the lower segment goes up about over 120 % according to the construction of upper tunnel.

Key Words : shield tunnel, earth pressure, centrifugal model test, arching

1. はじめに

幅狭する都市部においては地下空間の有効活用が求められ、シールドトンネル工法の多様化、施工の近接化が顕著となっている。MMS T工法は、このような背景の中で提案された大断面トンネル掘削工法の1つで、躯体の外郭部を複数の矩形シールドトンネルを先行して施工し、シールド内に躯体本体を構築後、内部掘削を行う工法である。これらのシールドトンネルは超近接の施工となるため、隣接するトンネル施工による影響が問題となる。著者らは円形断面、矩形断面の近接施工シールドトンネルに作用する土圧と、その発生メカニズムを解明するため、遠心載荷装置を用いた縮小模型実験を実施してきた¹⁾²⁾。砂地盤中の水平方向に隣接するトンネルにおいては、後行トンネルのテールボイドの発生に伴い、先行トンネルセグメントの頂部作用鉛直土圧が増加し、施工手順などの条件によっては土被り荷重を超えることがわかった³⁾⁴⁾。これは、後行トンネルのテールボイド発生に伴う土中の応力再配分に起因すると考えられる。このような影響を鉛直方向に隣接するトンネルにおいても確認するため、遠心模型実験を実施し、セグメントに作用する土圧や応力再配分メカニズムに関する検討を行った。

2. 実験概要

(1) 遠心載荷実験

遠心載荷実験は図-1に示す遠心載荷装置のプラットフォーム上に、図-2に示すトンネル模型装置を装着した土槽を搭載し、遠心加速度 $50g$ で順次トンネルカバーを引抜いてテールボイドを発生させた。この遠心力にお

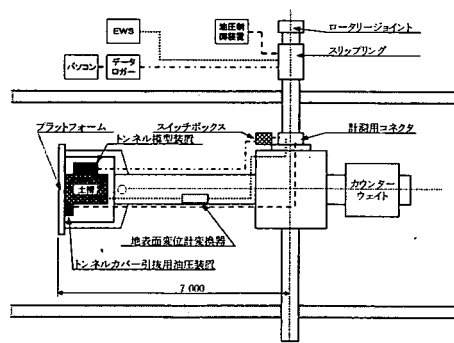


図-1 遠心載荷装置の概要

1) 正会員 首都高速道路公団 工務部 設計技術部

2) 正会員 ㈱竹中土木 技術本部 技術開発部

いては、重力場に対して表－１に示す相似則が成り立つ。本実験では、RCセグメントを想定し、セグメント模型に単位体積重量が同等の硬質アルミ（2.70gf/cm³）を採用した。地盤については相対密度 85%の豊浦標準砂を使用した。粒径は相似則により 50 倍相当となるが、作用土圧分布の評価に関しては特に影響要因とはならないと判断し、実験上取扱いの容易な材料として選定した。

(2) 模型装置

トンネル模型装置を図－３に示す。模型は 3 重構造となっており、内側より 2 本のスクリーコンベアを持つ排土装置、セグメント、トンネルカバーの順で構成される。施工によるテールボイドの発生は、土中に設置したトンネル模型のトンネルカバーを引抜くことにより発生させた。トンネルのセグメントは幅 50mm、高さ 100mm で、トンネルカバーは厚さ 1.5mm の鋼製とした。実験を実物大にすると、セグメントが幅 2.5m、高さ 5m、テールボイドが 75mm となり、MMST 工法で想定される外郭構成シールド寸法に匹敵する。また、セグメントは、切羽刃口と最後部を除いて 1 リングの幅 20mm で 13 リングの分割とし、リング間をシーリング材によって接合し可撓性をもたせることで地盤の動きに追随、底面に作用する地盤反力を計測できる構造とした。

(3) 計測項目

計測は、表－２に示す各項目を対象とした。セグメントの作用土圧は、図－４に示すように、水平土圧 6 点×2、鉛直土圧 3 点×2 の合計 18 点において、受圧面が 1 辺 13mm の矩形小型ロードセルにより計測した。曲げモーメントは各辺 3 点の表裏に貼付した歪みゲージにより計測した。

また、地表面には図－２に示すように、トンネル直上を中心に 10cm 間隔で計 5 点に非接触式渦電流センサーを設置して変位計測を行った。また、トンネルのゆるみによる周辺地盤中の応力を把握するため、図－２に示す 3～5 力所に土圧計を埋設した。土圧計は定格 5.0kgf/cm² で、受圧面直径 30mm の円形のものを使用した。土圧計を土中に埋設したことによる影響が予測されたため、2 回の併設実験では埋設位置を左右対称に配置することで、その影響の定性的把握を試みた。

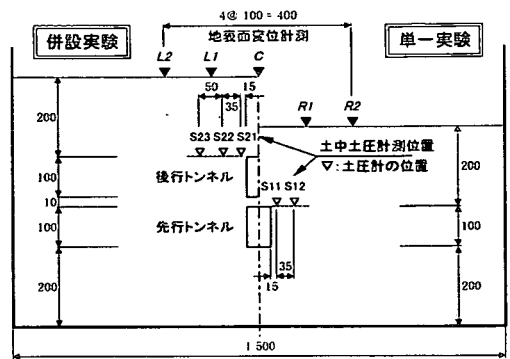
(4) 実験手順

トンネル模型装置には排土機構を備えているが、遠心力場において掘削すると周辺地盤が乱れることから、本実験においては、砂地盤作成の際に図－２の位置にトンネルカバーを被せたセグメントを据え付けた。遠心载荷装置に搭載した実験装置は、遠心載

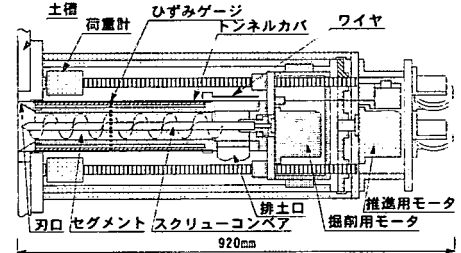
表－１ 相似則

項目	記号	相似則	
		理論値	実験の縮尺
加速度	g	n	50
地盤の応力	σ	1	1
変位量	s	$1/n$	1/50
土被り	H	$1/n$	1/50
トンネル外径	D	$1/n$	1/50
セグメント重量	Ws	$1/n^2$	1
地盤反力	σ_v	1	1
弾性係数	E	1	約2
変形	δ	約1/2n	約1/100
曲げモーメント	M	$2/n^2$	$2/50^2$

注「相似則」欄の各値は実物を1とした時の選心場の所要倍率を表す。



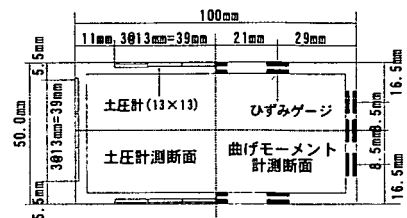
図－２ 実験土槽断面



図－３ トンネル模型実験装置構造図

表－２ 実験計測項目

計測項目	計測装置	計測点数	備考
地表面沈下量	非接触式ギャップセンサー	5 点	
セグメント作用土圧	セグメント付属ロードセル	18 (鉛直土圧:6点×2) (水平土圧:3点×2)	トンネル1本あたり
セグメント曲げ歪み	セグメント付属歪みゲージ	12 (3点/1辺×4)	トンネル1本あたり
土中土圧(鉛直方向)	土圧計(φ30mm)	3～5 点	



図－４ セグメント構造断面図

荷運転開始から概ね 10 分程度で 50g 遠心場に達する。その後、地表面変位がある程度落ち着くまでの間約 10 分の継続载荷を行い、トンネルカバーの引抜きによりテールボイドを発生させる。トンネルカバー引抜きは下側トンネルを先行し、これも引抜き後の地表面の変位量が安定した後に上側後行トンネルの引抜きを行う。これら手順を図-5に示す。

3. 実験結果

(1) 実験ケース

実験はトンネル1本のみのケース（以下 *V1-2* と称す）及び2本を鉛直に併設して行ったケース（以下それぞれを *V2-1*・*V2-2* と称す）を実施した。併設トンネル実験は上下2本のトンネル間の離隔をトンネル高さ 100mm の 1/10 の 10mm とし、下側トンネルを先行とする同じ条件で2回行った。また、いずれのケースも最終的な土被りは 200mm とした。

(2) 砂地盤土槽の作成

土槽への砂の撒布は専用の砂撒布装置により実施した。装置は高さ可変式のホッパーに計量した砂を投入し、開口幅及び落下高さを一定として砂を落下、締め固めた。地盤の相対密度は 85% を目標とした。各実験の土槽作成結果を表-3に示す。

(3) 地表面変位計測

図-6の左側に各実験の地表面変位計測の変化を示す。いずれも、計測初期値を遠心载荷装置運転開始直前としている。また、図-6の右側は、左側の図中に▽で示した先行のトンネルカバー引抜き開始直前を初期値とした各トンネルのカバー引抜き後の地表面変位の分布を示したものである。経時変化の図より、遠心载荷の開始と同時に地表面は沈下を始め、遠心場に至って落ち着くまでの間、併設トンネル実験（砂層厚 610mm）では約 1.3~1.7mm、また単一トンネル実験（砂層厚 500mm）では約 1.0mm の初期沈下となった。

下側の先行トンネルカバーの引抜きによる沈下は、土被りが 310mm と深いことや、上に後行トンネルが

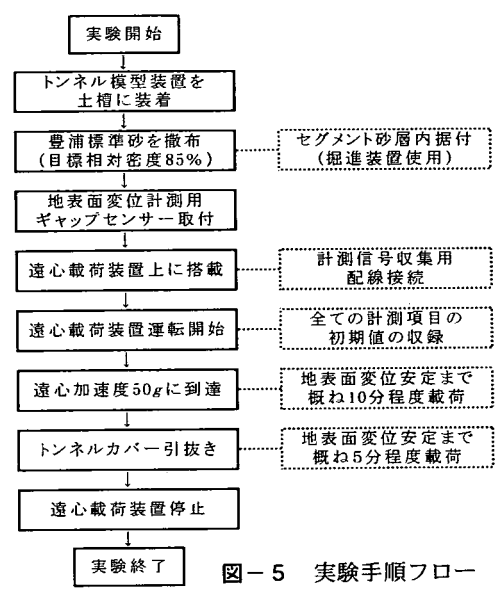


図-5 実験手順フロー

表-3 砂地盤作成結果

項目	記号	単位	V2-1	V2-2	V1-2
砂層全厚	H	mm	610	610	500
砂撒布重量	W	gf	434,840	435,298	357,735
乾燥密度	γ	gf/cm ³	1.602	1.603	1.601
間隙比	e		0.647	0.645	0.648
相対密度	D_r	%	84.9	85.3	84.6

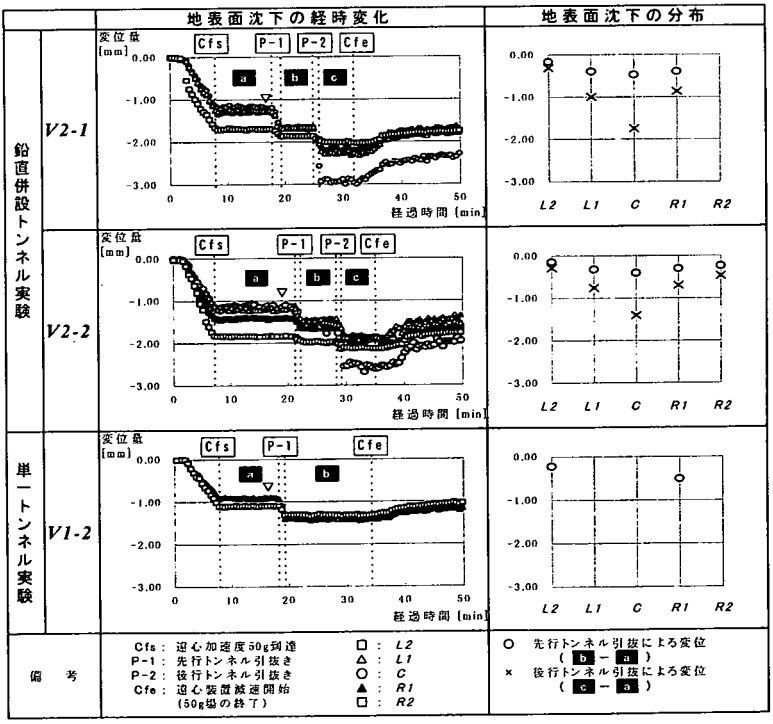


図-6 地表面変位量計測結果

埋設されているために、地表面への影響はほとんど見られなかった。一方、後行のトンネルカバー引抜きでは、トンネル中央直上の C 点においてテールボイドに相当する約 1.5mm の沈下が生じた。

(4) セグメント作用土圧

トンネルカバーの引抜きにより発生したセグメントへの作用土圧及び曲げモーメントの分布を図-9に示す。頂部の平均土圧は、併設の後行トンネルにおいては欠損データがいくつかあるが、得られた計測データは Terzaghi のゆるみ幅に対して算出されるゆるみ土圧 0.6kgf/cm^2 に比べていずれも小さかった。これは、模型装置に設けられた、計測配線をかむためのスリットが後行トンネルカバーでは頂面に位置しており、この影響を受けて実験のゆるみ領域の幅が理論上の幅に比べて小さくなっている事に起因すると考えられる。側方土圧が左右で異なる値を示しているのもこのスリットの影響と思われる。

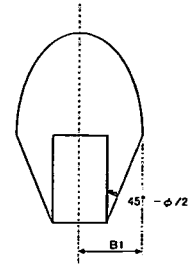


図-7 ゆるみ領域のイメージ

また、トンネル側面に作用する土圧は3ケースとも上方ほど大きく下方へ行くにつれて小さくなる傾向を一樣に示している。このことは、ゆるみの発生に伴い生成するゆるみ領域内の主働領域が、図-7に示すように上側ほど大きく下側ほど小さいことに関連するものと考えられる。

併設トンネル実験における後行トンネルのゆるみによる先行トンネルへの影響は、上側の後行トンネルのトンネルカバー引抜きに伴い、下側の先行トンネルに作用する側方土圧が約20~30%増加する結果として現れた。

セグメントに作用する曲げモーメントは、セグメント表裏の歪み計測値から求めた値と、土圧計測値を骨組解析に入力して求めた値が得られており、図にはその両方をあわせて表示したが、値にばらつきはあるものの、傾向は概ね一致している。

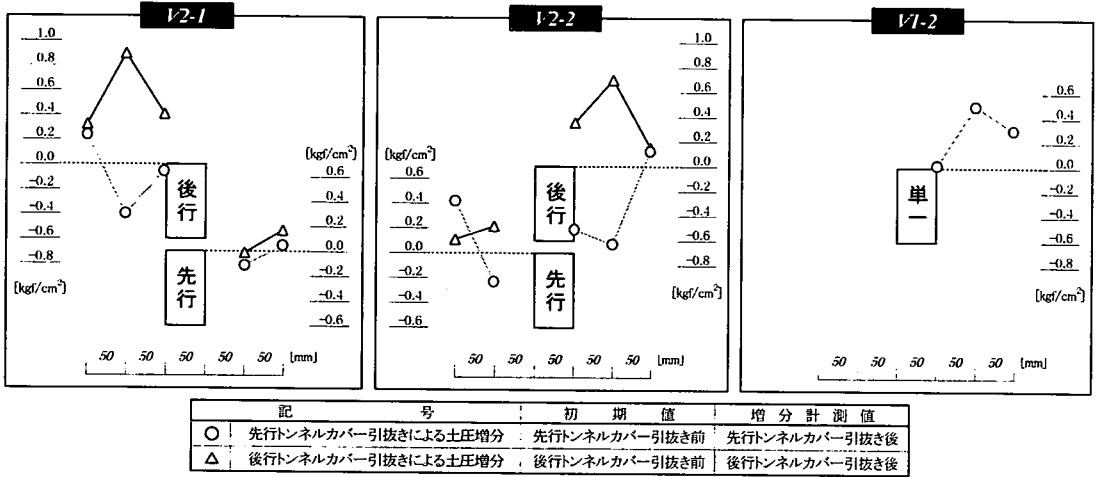


図-8 土中鉛直土圧増分

(5) 地盤中の土圧増分

図-8は遠心载荷が 50g に安定した後の土中土圧計の指示値を初期値として、各トンネルカバー引抜き後の鉛直土圧の増分値をプロットしたものである。

併設トンネル実験結果に着目すると、先行トンネルカバー引抜き時の下側の先行トンネル頂面高さ（全土被り相当圧 2.48kgf/cm^2 ）においては、トンネルからの離隔がトンネル幅に相当する 50mm の位置では減少し、トンネル幅の2倍にあたる 100mm の位置では増加している。また、上側の後行トンネル頂面高さ（全土被り相当圧 1.60kgf/cm^2 ）においても 50mm の位置では減少、100mm の位置では増加している。

土中の鉛直土圧の変化は、トンネルカバー引抜きにより周辺地盤中に生成したゆるみ領域内においては鉛直土

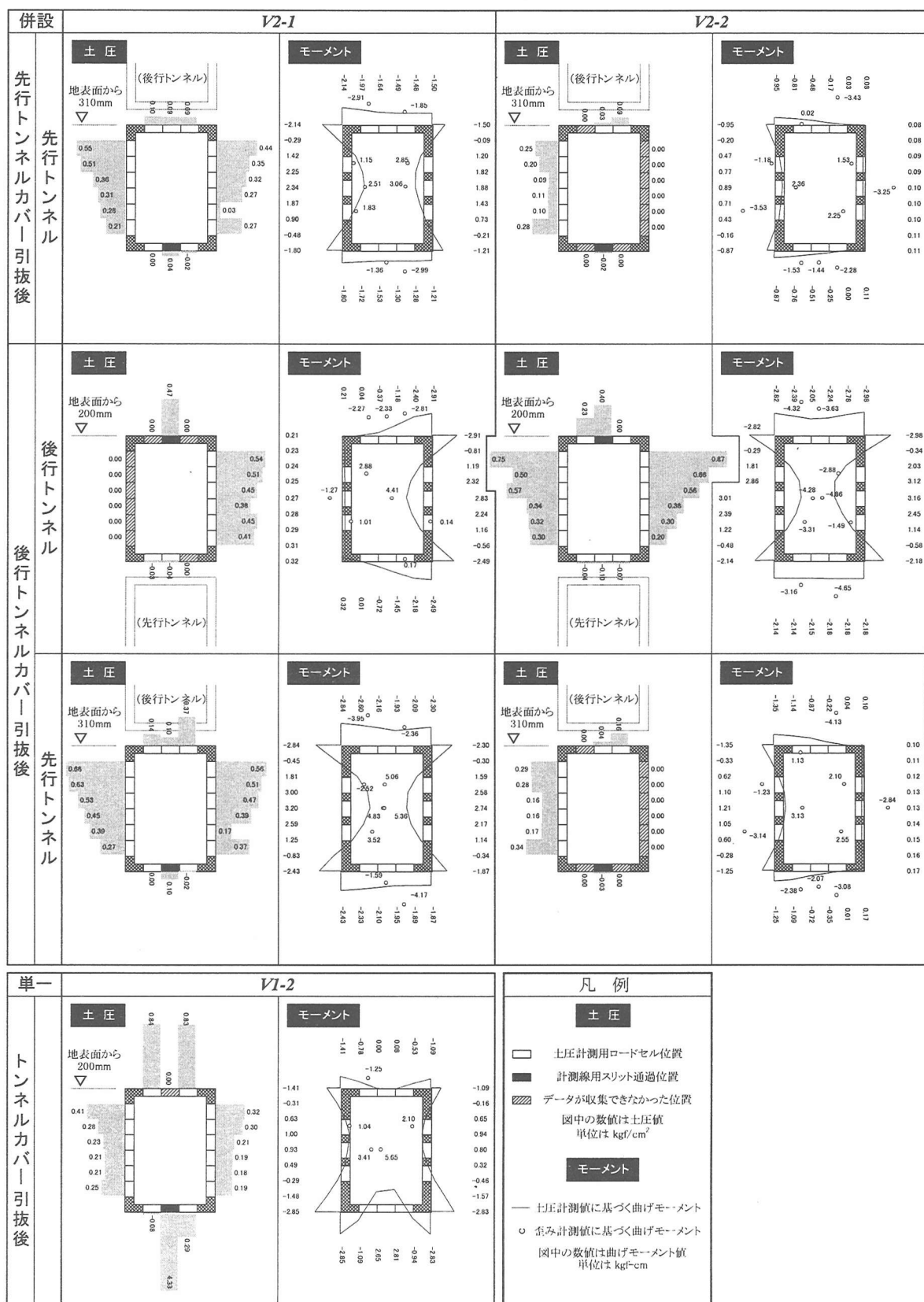


図-9 作用土圧・曲げモーメント計測結果

圧が減少し、領域外のグラウンドアーチの足がかかる位置近傍では増加することによる。しかしこの実験においては、下側の先行トンネルはカバー引抜きの段階ですでにその上部に後行トンネルが埋設されており、このため特に頂面のテールボイドによるゆるみ領域は単一トンネルの場合とは異なる形状となっているものと思われる。このことは、図-9に示す土圧分布の形状及び数値が、鉛直併設実験の先行トンネルのものと単一実験のもので大きく異なっていることから理解できる。

4. まとめ

以上の遠心模型実験の結果、以下のことがわかった。

- ① トンネルカバー引抜きによりセグメント側面に作用した水平方向土圧は、いずれの実験結果においても上側が大きく下側が小さい分布となった。これは土中のすべり線で囲まれた主働領域の大きさに相当しており、このことから、縦長矩形トンネルの側面のゆるみ領域が図-7に示すような形状で分布していることが確認できた。
- ② 鉛直方向の併設トンネル実験においては、下側先行の場合、後行トンネル施工による先行トンネルへの影響により、水平方向作用土圧は20～30%の増加する。
- ③ 地表面への影響は、土被りがトンネル高さの2倍程度においては、トンネル軸を中心として左右にトンネル幅の2倍程度の範囲内であり、その大半が土被りの浅い上側の後行トンネルの施工時に発生した。また沈下量は最大でテールボイド幅相当であった。

5. おわりに

縦長矩形トンネル模型実験による一連の検討により、上下に近接して施工される場合は、下側の先行トンネルの水平土圧が上側の後行トンネル施工の影響で増加することなどが明らかになった。一方で計測結果については、同一条件で実施している2回の併設トンネル実験結果において計測値のばらつきが大きく、土圧などの定量的評価が困難となった。これは、上側の後行トンネル頂部にトンネルカバーのスリットが来る構造であったためと考えられ、今後装置の改造を検討している。

また、実験装置には掘進排土装置が備え付けられているが、今回の実験では掘進による切羽圧力が大きくなる可能性があり使用せず、トンネル装置を地盤中にセットした状態での併設トンネル実験となった。このため、下側の先行トンネルのテールボイド発生時には上側にトンネル模型装置がある状態でゆるみが発生する形となり、境界条件が現実とは異なっている。

今後、上述の問題点の対策を検討するとともに、解析によるメカニズムの解明にも取り組んで行きたい所存である。なお、本実験にあたり多大なご協力とご助言を賜った東京都立大学今田徹教授に深く謝意を表します。

(参考文献)

- 1) 小笠原政文、佐々木一哉、藤井義文、真川三雄：超近接シールドの作用土圧に関する遠心力実験（その1）鉛直に隣接する円形シールド、第31回地盤工学研究発表会、1996
- 2) 小笠原政文、佐々木一哉、藤井義文、畑中善徳、近 信明：超近接トンネルの断面力特性に関する遠心実験（その2）砂質地盤中の鉛直に隣接する円形セグメント、土木学会第51回学術講演会、1996
- 3) 小坂寛己、今田 徹、小笠原政文、津野和宏、藤井義文、平井 卓：水平に近接した2本の円形セグメントに作用するゆるみ土圧、土木学会論文集、1998
- 4) 小笠原政文、津野和宏、松本浩二、藤井義文、平井 卓、野村成樹：併設矩形シールドセグメントの作用土圧に関する遠心載荷実験、第33回地盤工学研究発表会、1998