

近接トンネル掘削時の影響に関する実験的検討

石村利明* 真下英人**

1. はじめに

近年、都市部周辺においては土被りが薄く、地山強度の比較的低い条件下でのトンネルの建設が増加している。都市部周辺におけるトンネル計画にあたっては、道路トンネルを例に考えると、交通容量を確保するため、上下線2本のトンネルが必要となることが多い。このような場合、通常の山岳部における近接トンネルでは、相互のトンネルが影響しないように十分な間隔を取って計画されるのが一般的である。しかし、都市部においては、用地の確保の問題や周辺環境の保全などから、2本のトンネル相互の離隔がない、いわゆるめがねトンネルや離隔が極めて小さいトンネルが計画される場合がある。また占有幅の制約等が非常に厳しい場合には上下に近接してトンネルが計画される場合も考えられる。2本のトンネルの間隔が小さい近接トンネルの場合には、後続のトンネル掘削によって先行トンネルが何らかの影響を受けることが分かっているが、現状ではその影響の程度は明らかになっていないことが多い。

本研究は、固結度の低い砂質地山を対象として、2本のトンネルが左右近接および上下近接条件で施工される場合の先行トンネルの作用荷重、地表面沈下への影響を把握することを目的として実施した3次元の掘削模型実験結果について報告するものである。

2. 実験方法

2.1 実験の概要

実験は、図-1に示すような土槽を用いて直径 $D=30\text{cm}$ のトンネルを掘削する方法とした。実験は、土槽内に所定の含水比に調整した豊浦標準砂を1層約10cm

毎に密度管理しながら地山を作成し、その後、1掘進長として3cm ($0.1D$) の掘削を手掘りにより行い、逐次覆工を建て込む操作を繰り返してトンネルを構築する方法とした。まず、先行トンネルを所定の掘削長まで掘削し、その後、後行トンネルを先行トンネルと同様な方法で掘削を行った。掘削長は手掘りで掘削できる限界長の42cmとした。覆工は、アーチ部分と底板部分とから構成され、相互が接触するアーチ部分の脚部の隙間に、反力の小さいバネを挿入しておき、掘削面と覆工との間隙を極力なくすようにした。覆工材にはトンネルの変形に対してある程度の剛性を確保できるように厚さ10mmの亚克力材を用い、覆工背面

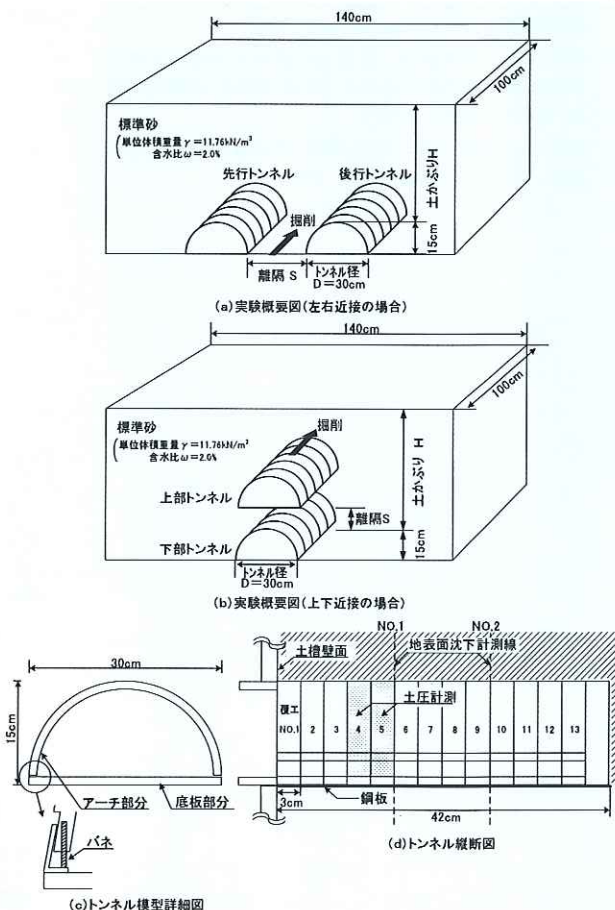


図-1 近接トンネル実験の概要図

は滑らかな状態である。

2.2 実験地山材料

実験に用いた地山は、2%に含水比調整した豊浦標準砂を用いた。材料の選定にあたっては、実際にトンネルを掘削する手法であることから、トンネル掘削時に切羽が安定することを条件として決定した。本実験に使用した地山材料の物性値は、低応力一面せん断試験により、粘着力 $c = 0.49 \text{ kN/m}^2$ 、内部摩擦角 $\phi = 33.6^\circ$ が得られている。

2.3 計測項目および計測方法

計測は、トンネルに作用する鉛直方向の荷重を測定できるように覆工の左右に2個ずつ、計4個の小型荷重計(直径12mm, 厚み4mm)を2つの覆工(覆工NO.4, 覆工NO.5)に設置し、トンネルの各掘削段階毎に測定を行った。また、上下近接の場合について、上先行と下先行の違いによる地表面沈下の影響を確認するためレーザ変位計により地表面沈下を測定した。

2.4 実験ケース

実験ケースは、表-1に示すように近接条件として左右近接、上下近接の2種類について実施した。左右近接は、トンネル間の離隔 S を $0D$, $0.1D$, $0.25D$, $0.5D$, $1.0D$ の5条件とし、土被り

表-1 実験ケース

実験 No.	近接の 条件	土被り比 H/D	離隔S	先行トンネ ルの位置	備考	
1	左右近接	1	0D	左		
2			0.1D			
3			0.25D			
4			0.5D			
5			1.0D			
6		2	0D			
7			0.1D			
8			0.25			
9			0.5D			
10			1.0D			
11		3	0D			
12			0.1D			
13			0.25D			
14			0.5D			
15			1.0D			
16	上下近接	1	0.25D	下	後行トンネル掘削時に先行 トンネルを縦断方向に固定	
17		(0.25)*		上		
18		1.5		下		
19				上		
20				上		
20		2		下		
21				上		
22				上		

※下部トンネルの土被りで表示、()は上部トンネルの土被りで表示

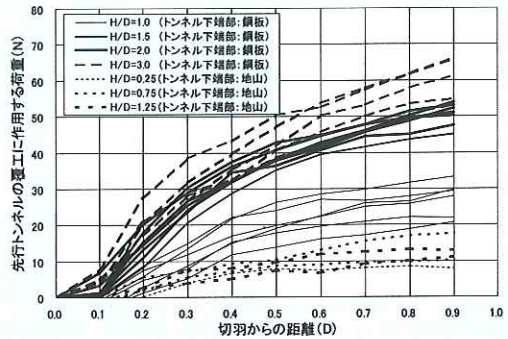


図-2 切羽進行に伴う先行トンネルの作用荷重の変化

比 H/D (H は土被り) が 1、2、3 の 3 条件について実施した。上下近接は、上下のトンネルの離隔 S を $0.25D$ の一定として、下部トンネルの土被り比 H/D が 1、1.5、2 の 3 条件について、上部トンネル先行の場合と下部トンネル先行の場合についてそれぞれ実施した。なお、図-1 に示すようにトンネル下端部は、上下近接の上部トンネルを先行するケースでは地山となっているためトンネル脚部の沈下を許すが、それ以外のケースは全て実験土槽底部(鋼板)でトンネル脚部の沈下を許さない条件となっている。また、上部トンネルを先行トンネルとして掘削した場合に、後行トンネル掘削時に先行トンネルの底板部分を棒鋼により縦断方向に連結(固定)した条件も併せて実施した。

3. 実験結果

3.1 先行トンネルの作用荷重

近接トンネルの影響を把握する際には先行トンネルに作用している荷重が基準となる。以下に先行トンネル掘削時の作用荷重の結果を示す。

(1) 切羽進行に伴う作用荷重の変化

表-1 の左右近接実験、上下近接実験の全ケースについて、先行トンネルに作用する荷重の切羽進行に伴う変化を図-2 に示す。トンネルに作用する荷重は、土圧計測を行った覆工 NO.4 と NO.5 の平均値を用いた。また、図中の土被り比 H/D は先行トンネルの土被りで示した。図より、覆工にかかる荷重は全ケースとも覆工を建て込み後、徐々に増加する傾向がある。荷重が収束するまでの距離は、土被り比 H/D が 2 までは切羽からの距離が約 $1D$ 付近まで

にはほぼ収束する傾向が認められる。しかし、土被り比 H/D が 3 の場合は切羽からの距離が約 1D 付近においても若干の増加傾向にある。したがって、土被り比 H/D が 3 の結果は参考値として取り扱うこととする。

(2) 先行トンネルの作用荷重

図-3 にほぼ収束したと考えられる最終のトンネルの作用荷重として切羽からの距離 0.9D の荷重について実験値と全土被り土圧、次式 (1) より算出されるテルツァーギの緩み土圧¹⁾と比較を行った。土被り比 H/D は、先行トンネルの土被りで整理した。ただし、実験値は、計測されたトンネルの作用荷重をトンネル底盤の面積 (覆工幅 (30cm) × トンネル覆工長さ (3cm)) で除して求めた。

$$\sigma_v = \frac{B_1(\gamma - C/B_1)}{K_0 \tan \phi} \cdot (1 - e^{-K_0 \tan \phi \times H/B_1})$$

$$B_1 = R_0 \times \cot((\pi/4 + \phi/2)/2) \quad (1)$$

ここで、 σ_v ：テルツァーギの緩み土圧、 H ：土被り、 B_1 ：緩み幅、 K_0 ：静止土圧係数、 ϕ ：土の内部摩擦角、 γ ：土の単位体積重量、 c ：土の粘着力、 R_0 ：トンネル径

なお、算定に用いた地山物性値は、土質試験結果に基づき、単位体積重量 $\gamma = 11.76 \text{ kN/m}^3$ 、粘着力 $c = 0.49 \text{ kN/m}^2$ 、内部摩擦角 $\phi = 33.6^\circ$ を用い、静止土圧係数 K_0 は Jaky の式により $K_0 = 1 - \sin \phi$ によって求めた 0.45 を用いた。図より、左右近接、上下近接 (下部トンネル先行) の条件では、土被り比 H/D が 1 の土被りが比較的薄い場合は、概ね全土被り土圧が作用するが、土被り比 H/D が 2 の場合は、全土被り土圧は作用せず、テルツァーギの緩み土圧に近づく傾向があることが分かる。

一方、上下近接 (上部トンネル先行) の場合は、

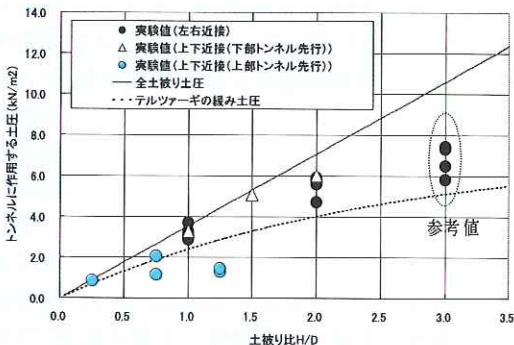


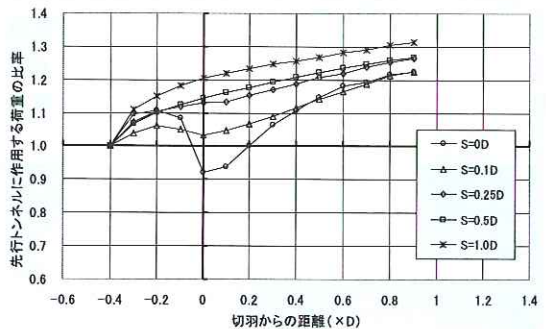
図-3 先行トンネルの作用荷重

土被り比 $H/D = 0.25$ の場合はほぼ全土被り土圧となっているが、 $H/D = 0.75$ および 1.25 は概ねテルツァーギの緩み土圧程度もしくはそれ以下になっており、上下近接 (上部トンネル先行) が左右近接、上下近接 (下部トンネル先行) よりも全体的に小さくなっている。

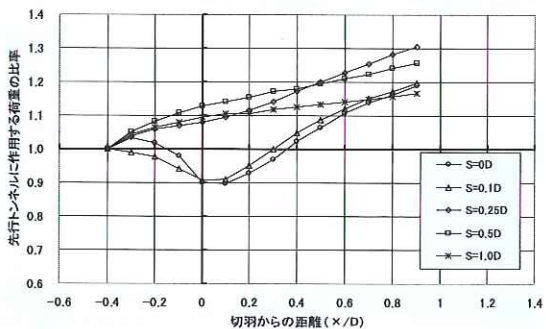
左右近接、上下近接 (下部トンネル先行) と上下近接 (上部トンネル先行) で異なった傾向を示した理由としては、左右近接、上下近接 (下部トンネル先行) はトンネル底部が土槽底部の鋼板であるため、トンネルの沈下を許さない条件であるのに対して、上下近接 (上部トンネル先行) はトンネル底部が地山となっているために、トンネル脚部の沈下をある程度許す条件になっており、土被りが浅くても掘削に伴ってトンネル上方にアーチが形成されたためと考えられる。

3.2 左右近接の影響

図-4 に土圧計測を行った覆工 NO.4 と NO.5 について、後行トンネルの切羽進行に伴う先行トンネルに作用する荷重の変化を、後行トンネル掘削



(a) 先行トンネルの覆工に作用する荷重
(トンネルの土被り $H/D=1$)

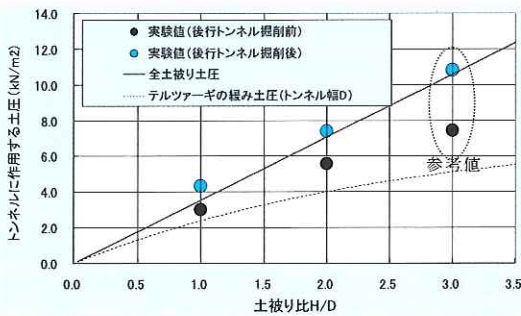


(b) 先行トンネルの覆工に作用する荷重
(トンネルの土被り $H/D=2$)

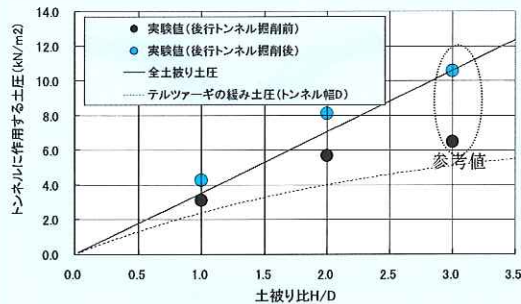
図-4 後行トンネル切羽進行に伴う先行トンネルの作用荷重の変化

前を基準とした比率で示した。比率は、覆工 NO.4 と NO.5 の平均値を用いた。トンネルの離隔 S が $0D$ 、 $0.1D$ では、土被り比に関係なく後行トンネルの切羽が先行トンネルの覆工 NO.4 と NO.5 付近を通過した時に先行トンネルの作用荷重は一旦減少した後に増加する傾向が認められるが、それ以上の離隔においては後行トンネルの掘進に伴い、先行トンネルの作用荷重は単調に増加する傾向にあることが分かる。なお、土被り比の差によるトンネル作用荷重の変化傾向に顕著な差は見受けられない。

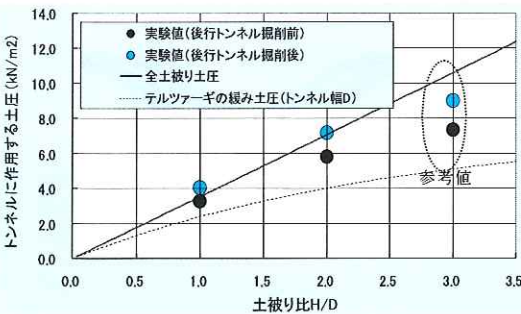
図-5 にトンネルの離隔 S が $0D$ 、 $0.25D$ 、 $1.0D$ における後行トンネル掘削前、終了後の先行トンネルの作用荷重を示す。図中には、全土被り土圧お



(a) トンネルの離隔 $S=0.0D$



(b) トンネルの離隔 $S=0.25D$



(c) トンネルの離隔 $S=1.0D$

図-5 後行トンネル掘削前後の先行トンネルの作用荷重

よび式 (1) により算出されるテルツァーギの緩み土圧も併せて示した。図より、土被り比 $H/D=1$ の場合は、当初全土被り土圧程度であった荷重が、後行トンネル掘削に伴って増加し、全土被り土圧以上の荷重が作用していることが分かる。

また、土被り比 $H/D=2$ の場合は、当初全土被り土圧が作用していなかったが、後行トンネル掘削に伴って概ね全土被り土圧程度の荷重まで増加していることが分かる。この荷重の変化は、増加の程度の差はあるものの、いずれの離隔においても同様な傾向が認められる。この現象は、当初先行トンネルの掘削によって形成されていた地山アーチ効果が後行トンネル掘削によって形成できなくなり、荷重が増加したものと考えられる。したがって、後行トンネル掘削後の先行トンネルの作用荷重は、離隔が $1D$ までの範囲であれば離隔に関係なく、土被り比 $H/D=1$ の場合は、全土被り土圧以上の荷重が作用する場合があります、土被り比 $H/D=2$ の場合は、全土被り土圧程度まで増加すると言える。

3.3 上下近接の影響

(1) 後行トンネル掘削に伴う先行トンネルの作用荷重の変化

1) 下部トンネル先行の場合

図-6 に下部トンネル先行の場合の後行トンネルの切羽進行に伴う先行トンネルの作用荷重の変化を示す。図中の土被り比 H/D は先行トンネルの土被り比を示す。図より、先行トンネルの上部にトンネルを掘削した場合、先行トンネルの作用荷重は後行トンネルの掘削によって大きく減少し、先行トンネル掘削終了時の 5~6 割程度となっていることが分かる。

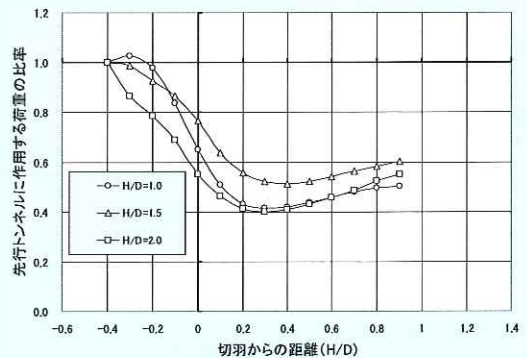


図-6 後行トンネル切羽進行に伴う先行トンネルの作用荷重の変化 (下部トンネル先行)

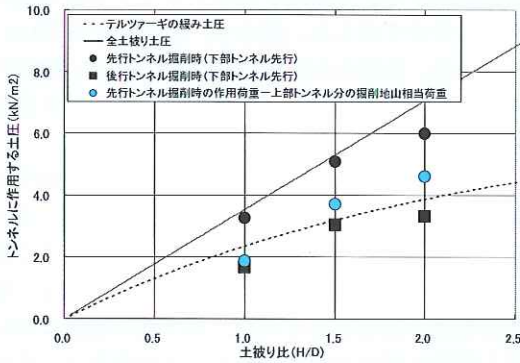


図-7 後行トンネル掘削前後の先行トンネルの作用荷重 (下部トンネル先行)

図-7に後行トンネル掘削前後の荷重の変化を示す。参考値として、先行トンネル掘削終了時に測定された作用荷重から上部トンネルの掘削地山相当荷重を差し引いた値を示した。図より、下部トンネル先行の場合は、ほぼ全土被り土圧程度作用していた荷重が上部トンネルの掘削地山相当荷重を含めて大きく減少し、概ねテルツァーギの緩み土圧程度に減少することが分かる。この減少は、上部のトンネルを掘削することによって掘削地山分の上載荷重が除荷されることによる影響が大きいものと考えられる。

2) 上部トンネル先行の場合

図-8に上部トンネル先行の場合の後行トンネルの切羽進行に伴う先行トンネルの作用荷重の変化を示す。先行トンネル下部にトンネルを掘削した場合は、下部トンネルの掘削により上部トンネルの作用荷重が減少し始め、切羽通過後0.1Dから0.2Dで最小となった後、上昇し、切羽通過後0.9Dでの値は後行トンネル掘削前の作用荷重

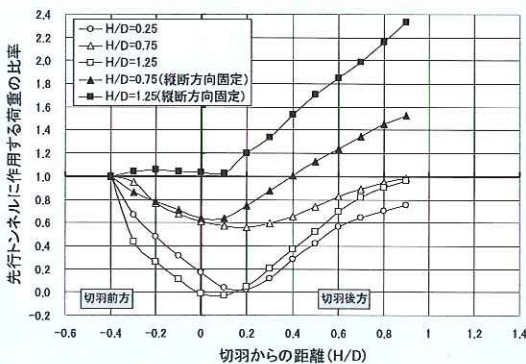


図-8 後行トンネル切羽進行に伴う先行トンネルの作用荷重の変化 (上部トンネル先行)

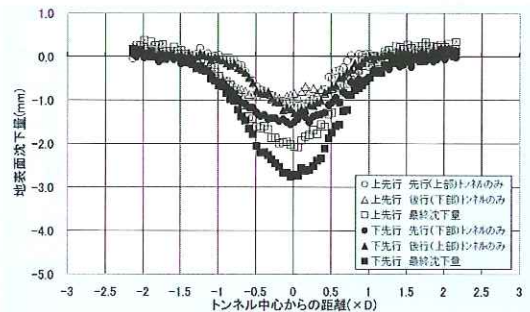
の8割から同程度となることが分かる。ただし、上部トンネルを縦断方向に固定した場合は、下部トンネル掘削により生じる作用荷重の減少率は小さく、切羽通過後の最終的に先行トンネルに作用する荷重は後行トンネル掘削前の1.5から2.4倍程度まで上昇することが分かる。

上部トンネルを縦断方向に固定した場合に上部トンネルに作用する荷重が増加したのは、上部トンネルを縦断方向に固定しない場合は、下部トンネルの掘削に伴ってそれぞれの覆工が単独で沈下するのに対して、上部トンネルを縦断方向に固定することで上部トンネルが一つの先受工として機能し、下部トンネル掘削時に発生するトンネル上部の地山が下に移動しようとする動きに抵抗したためと考えられる。

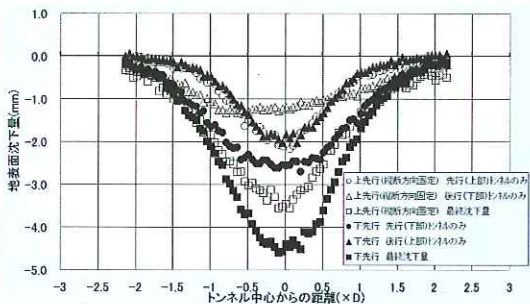
実際のトンネルは、縦断方向に固定した場合に近い状態と考えられることから、上部トンネルの下部にトンネルを掘削した場合の上部トンネルに作用する荷重は、下部トンネル掘削の影響により増加することが考えられる。

(2) トンネル掘削時の地表面沈下

図-9に下部トンネルを基準にした場合の土被り比H/Dが1、1.5の各トンネル掘削後の地表面沈下曲線を示す。なお、土被り比H/Dが1.5の上先



(a) 土被り比 H/D=1



(b) 土被り比 H/D=1.5

図-9 トンネル掘削後の地表面沈下

行の場合の上部トンネルについては、実際トンネルの条件に近い縦断方向に固定した場合を示す。

図より、 H/D が 1 の場合は先行トンネルの下部にトンネルを掘削した場合 (上先行の場合) の最終的な地表面沈下は、先行トンネルの上部にトンネルを掘削した場合 (下先行の場合) よりも小さいことが分かる。また、トンネル掘削時の地表面沈下を各掘削段階毎に見ると、上部トンネル掘削時でみると上先行・下先行時にそれぞれ約 1.1mm、約 1.3mm で同程度の沈下が、下部トンネル掘削時でみると上先行・下先行時にそれぞれ約 1mm、約 1.5mm の沈下が生じ、上先行時が下先行時に比べて約 0.5mm 小さくなっている。これは、トンネルの剛性が地山に比べると大きいために先行トンネルの下部にトンネルを掘削した場合には先行トンネルが一種の地盤改良効果として地表面沈下抑制効果を発揮するためと考えられる。

次に、土被り比 H/D が 1.5 の場合の最終的な地表面沈下を見ると、 H/D が 1 の場合と同様に先行トンネルの下部にトンネルを掘削した場合 (上先行の場合) の最終的な地表面沈下は、先行トンネルの上部にトンネルを掘削した場合 (下先行の場合) よりも小さいことが分かる。また、トンネル掘削時の地表面沈下を各掘削段階毎に見ると、上部トンネル掘削時でみると上先行・下先行時にそれぞれ約 2.1mm、約 2mm の沈下が、下部トンネル掘削時でみると上先行・下先行時にそれぞれ約 1.2mm、約 2.6mm の沈下となっており、下部トンネル掘削時には先行トンネル覆工の地表面沈下抑制効果が現れていることが分かる。

地表面沈下の横断方向への影響範囲は、土被り比によって異なり、土被り比 1 でトンネル中心から約 1.5D、土被り比 1.5 で約 2D となっている。これは、これまで一般的に考えられているトンネル底部の端部から $45^\circ + \phi/2$ の角度でトンネル外側の上部へ引いた範囲と概ね一致する。

4. まとめ

近接施工時における既設トンネルへの影響を把握するため、固結度の低い砂質地山を対象とした左右近接および上下近接トンネルの 3 次元掘削模型実験により得られた結果をまとめると以下のようになる。

(1) 左右近接トンネルにおいて、後行トンネル掘削時の先行トンネルの作用荷重は、離隔が

小さい ($S=0D, 0.1D$) 場合では、土被りに関係なく、後行トンネルの切羽通過時に一旦減少した後に増加する傾向を示す。それ以上の離隔 ($S=0.25D, 0.5D, 1.0D$) では、土被りに関係なく後行トンネルの切羽進行に伴って先行トンネルの作用荷重が徐々に増加する傾向を示す。後行トンネル掘削後の先行トンネルの作用荷重は、1D までの範囲であれば離隔に関係なく、土被り比 $H/D=1$ の場合は、後行トンネル掘削に伴って先行トンネルには全土被り土圧以上の荷重が作用することがあり、土被り比 $H/D=2$ の場合は、当初緩み土圧程度であった荷重が、全土被り土圧程度まで増加する。

(2) 上下近接トンネルにおいて、先行トンネルの上部にトンネルを掘削した場合の先行トンネルの作用荷重は、ほぼ全土被り近く作用していた荷重が、後行トンネルの切羽進行とともに全土被り土圧の 5~6 割程度まで減少し、テルツァーギの緩み土圧程度となる。一方、縦断方向にトンネルを固定した先行トンネルの下部にトンネルを掘削した場合は、下部トンネルの切羽通過により増加し、先行トンネルの作用荷重は、下部トンネル掘削前の 1.5 から 2.4 倍程度となる。

(3) 上下近接トンネルにおいては、上部トンネルを先行した場合は上部トンネルに下部トンネル掘削時に発生する沈下量を抑制する効果が期待でき、最終沈下量は上部トンネル先行のほうが下部トンネル先行よりも小さくなる。

参考文献

- 1) (社) 土木学会：トンネル標準示方書、シールドトンネル工法編・同解説, p43, 1996.

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

真下英人**



同 トンネルチーム
主席研究員, 工博
Dr. Hideto MASHIMO