

◆ 報 文 ◆

# 外部コストを考慮した都市トンネル建設工法の評価

石村利明\* 真下英人\*\*

## 1. はじめに

都市部におけるトンネルの建設工法は、大きくは山岳工法 (NATM)、シールド工法、開削工法に分類される。地表部を掘削する開削工法は、工事に伴う交通規制等による渋滞など周辺環境に与える影響が大きく、また、地表面における物理的な制約条件により適用できない場合があるが、土被りが浅い場合には一般的に経済的に有利と考えられている。NATMとシールド工法ともに地表面を改変しない工法であり、これまではNATMが適用できる地盤条件が限られていたが、トンネル技術の進歩によって適用可能となる地盤の対象範囲が広がるのに伴いNATMとシールド工法のどちらを選定すれば良いのか判断が難しいケースが増えている。一般的に、NATMは経済的に有利と言われているが、地盤の変状や施工中に水を抜くことによる水涸れなどの問題を起こす場合がある。一方、シールド工法は地盤の変状も小さく、水を抜かずに施工できるために周辺環境に及ぼす影響は少ないものの経済的に高価という短所を有している。

以上のように都市部におけるトンネル建設工法の選定は、各工法の特徴や適用条件等を考慮し、対象とするトンネルに適用可能な工法について工事費や工期等の比較を行い決定しているのが現状である。しかし、近年、環境に対する配慮の意識の高まりとともに、建設中における騒音・振動や地盤変状、あるいは工事に伴う交通規制による渋滞などの周辺環境などに対する影響をコストと言う尺度で比較して工法の選定の根拠とする考えもある。したがって、これらの影響を外部コストとして考慮した場合に最も経済的な工法を選定することが合理的であると考えられる。

そこで、本報文では図-1に示すように都市トンネルの建設工法 (NATM、シールド工法、開削工法) の選定において、これまでコストとして考慮していなかった周辺環境に与える様々な影響を「外部コスト」として考慮した場合の各工法の

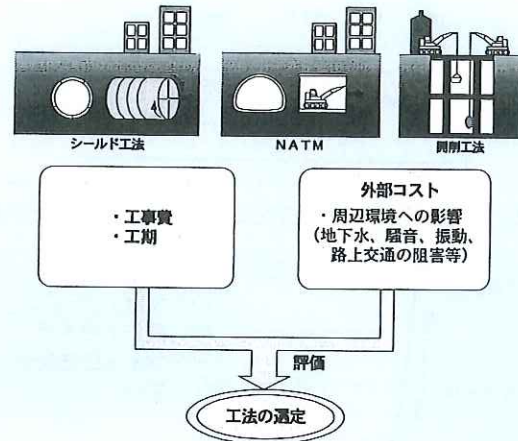


図-1 都市トンネルの工法選定の概念図

総コストを把握するため、都市トンネル建設時の外部コストを評価する上で必要となる項目 (騒音・振動・交通規制による渋滞などの周辺環境への影響) を整理し、外部コストの評価項目の抽出および実際に施工した工事での外部コストの試算を行うとともに、都市トンネルを想定したケーススタディを実施し、直接工事費に外部コストを加えた値を用いて比較・分析を行った。

## 2. 都市トンネル建設時の外部コスト評価項目の抽出および評価手法の選定

### 2.1 外部コスト評価項目の抽出

現在、都市部におけるトンネル建設工法の選定時に比較される主なコストは、直接工事費と企業者が支払う用地補償費である。通常、この合計金額によってコスト比較がなされ、工法選定の重要な資料として利用されている。

外部コストの評価項目の抽出にあたり都市トンネル施工時における周辺環境への影響の波及過程を整理すると、図-2のように考えられる。これより、影響を受ける対象としては、家屋・景観・生態系などに対する沿道・地域の社会的損失、大気に対する地域外の社会的損失、道路交通に対する道路利用者の社会的損失の3つが考えられ、外部コスト算出に用いる項目としては、図中に示す影響項目のうち太線で囲んだ項目であると考えられる。

### 2.2 外部コスト評価手法の選定

費用便益調査で用いられている評価手法は幾つ

Evaluation of Urban Tunneling Method Considering External Costs



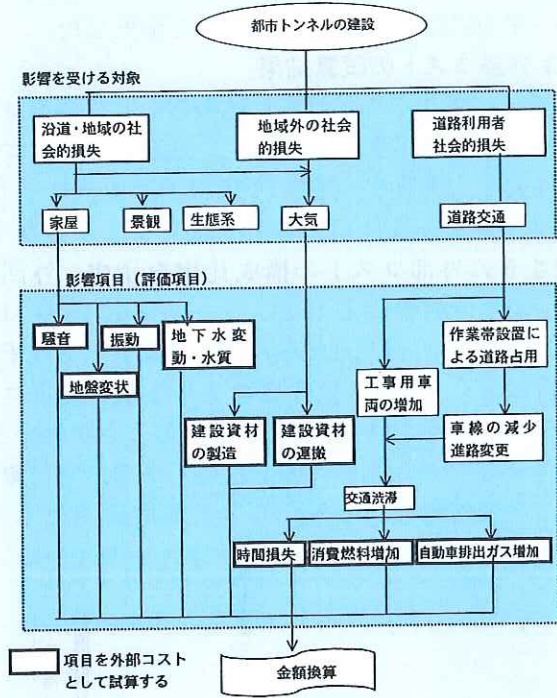


図-2 都市トンネルにおける外部コスト評価項目

か提案されているが、本検討は都市トンネル施工法選定のための外部コスト評価が目的であるため、評価方法が普遍的であることが望ましいこと、他の市場に置換するよりも直接評価項目の数量を用いて算定する方が根拠がわかりやすいことなどの理由により、直接利用者の便益を算定する「消費者余剰アプローチ」に基づいて外部コストを試算することとした。現在、この評価手法においても完全に確立されたものはなく、個別に検討して試行されているのが現状であるが、道路分野においては道路投資に関する便益調査手法として、「道路投資の評価に関する指針(案)」<sup>1)</sup>が提案されているため、上記の指針(案)に準拠することとした。

表-1 外部コストの試算方法

対象	項目内容		外部コスト試算の主な条件
沿道・地域	振動・地下水・地盤変状		補償費による
	騒音		$2,400,000 \text{ (円/dB/km/年)} \times \text{工事増加騒音 } 16\text{dB} \times \text{影響範囲} \times \text{工事期間}$
地域外社会	大気汚染	建設資材の製造	二酸化炭素 CO <sub>2</sub> 対象資材(コンクリート・鋼材)量 $\times 2,300 \text{ 円/t}$
		建設資材の運搬	二酸化炭素 CO <sub>2</sub> 対象ガス発生量 $\times 2,300 \text{ 円/t}$ 窒素酸化物 NO <sub>x</sub> 対象ガス発生量 $\times 2,920,000 \text{ 円/t}$
道路利用者	交通渋滞	時間損失	規制による速度減少(30km/h→20km/h)と渋滞長さによる損失時間 $\times$ 貨幣評価原単位(乗用車 56円/台・分、バス 496円/台・分、普通貨物 101円/台・分、小型貨物 90円/台・分) $\times$ 交通量
		消費燃料増加	規制による速度減少(30km/h→20km/h)と渋滞長さによる燃料損失分(ガソリン価格 100円/1ℓで計算) $\times$ 貨幣評価原単位(乗用車 17円/台・分、バス 66円/台・分、普通貨物 39円/台・分、小型貨物 33円/台・分) $\times$ 交通量
	自動車排ガス増加	二酸化炭素 CO <sub>2</sub> 対象ガス増加量 $\times 2,300 \text{ 円/t}$ 窒素酸化物 NO <sub>x</sub> 対象ガス増加量 $\times 2,920,000 \text{ 円/t}$	

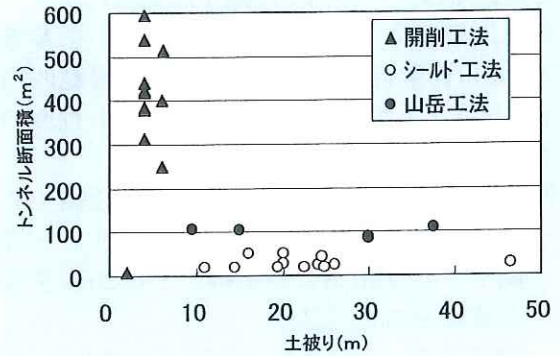


図-3 収集トンネルの土被りと断面積の関係

### 3. 都市トンネル施工時の外部コストの試算

#### 3.1 都市トンネルの事例収集

都市トンネルの工事实績における外部コストの算出を行うための事例を収集した。収集した事例は、開削工法 13 件、シールド工法 15 件、山岳工法 (NATM) 5 件で施工されたトンネルである。事例収集したトンネルの掘削断面積と土被りとの関係を図-3 に示す。これより、収集したトンネルの特徴としては、開削工法は土被りが小さくトンネル断面積が極めて大きい事例、シールド工法は比較的土被りが大きいもののトンネル断面積が小さい事例、NATM は土被りも大きく、トンネル断面積も大きい事例となっている。

#### 3.2 外部コストの試算

外部コスト試算は、文献<sup>1)</sup>に準拠することとし、表-1 に示す条件で実施した。なお、振動・地下水・地盤変状に伴う影響については補償費として外部コストに換算するように考えた。外部コスト算出に際して、今回の試算のために設定した基本条件を表-2 に示す。基本条件については、実際は現場ごとに異なるが、以下の考えに基づき設定した。



- ①運搬距離は、一律同じ距離を想定した。
- ②交通渋滞による走行速度は、文献<sup>2)</sup>を参考に500mの作業帯を設置した場合の影響範囲内の走行速度を実測した際の平均10km/h程度の速度減が発生すると仮定した。
- ③作業帯の延長は、工法別に次のように想定した。
  - ・ シールド工法；立坑約10m、プラント等設備ヤード50mおよび余裕として20mを加えた値の80mとした。
  - ・ 開削工法；工区延長に余裕として20mを加えた値とした。
  - ・ NATM；立坑長さ30mに余裕として20mを加え50mとした。
- ④騒音の影響範囲は、収集事例の実績より、作業帯端から約40m以上離れると55db(常時騒音)以下になることより、各工法の騒音の影響範囲は作業帯延長に80mを加えた値とした。
- ⑤交通渋滞の影響範囲は、文献<sup>2)</sup>を参考として500mの作業帯で影響範囲が3,000mであったことより、作業帯の長さに対する影響範囲の比率(3,000/500)を用いて算出した。

表-2 基本条件

項目		共通基本条件
運搬方法・ 単位運搬数量	掘削・埋戻し	10tダンプ 6m <sup>3</sup> /台 (埋戻し土比重1.7で想定、土木学会トンネル標準仕様書シールド編)
	コンクリート	生コン車 6m <sup>3</sup> /台
	鉄筋・鋼材	10tトラック 10t/台
	セグメント	10tトラック 10t/台
セグメント比重 (セグメントの重量換算で使用)		2.6t/m <sup>3</sup> (土木学会トンネル標準仕様書シールド編)
運搬距離	掘削残土運搬距離	12km (走行速度20km/h)
	埋戻し砂運搬距離	7km (走行速度20km/h)
	資材運搬距離	10km (走行速度20km/h)
走行速度	影響範囲渋滞無しの場合の平均走行速度 V	30km/h
	影響範囲渋滞時の平均走行速度 V <sub>0</sub>	10km/h
	影響範囲における平均速度損失	20km/h
作業帯延長	シールド工法	80m
	開削工法	工区延長+20m
	NATM	50m
騒音の影響範囲	シールド工法	160m
	開削工法	作業帯延長+80m
	NATM	130m
交通渋滞の影響範囲	シールド工法	480m (6×作業帯延長)
	開削工法	6×作業帯延長
	NATM	300m (6×作業帯延長)
騒音	常時	55dB
	施工時	71dB (シールド事例(4)の実績)
	増加	16dB

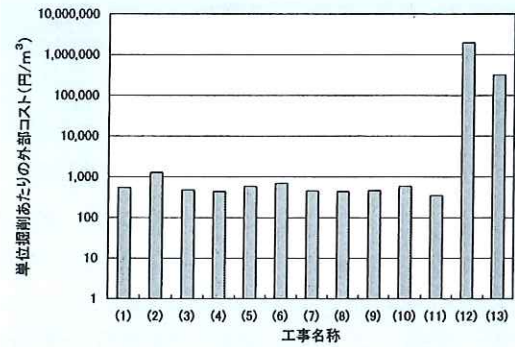
⑥施工に伴う騒音の変化は、収集事例の実績より、一律16dB増加すると想定して算出した。

### 3.3 外部コストの試算結果

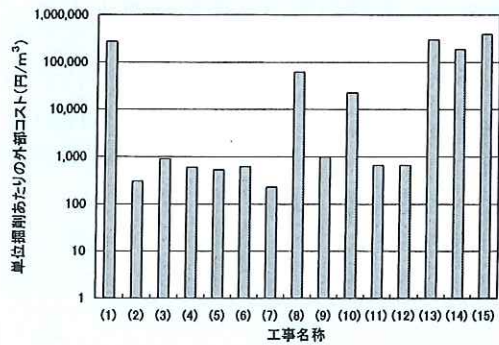
図-4に各工事の単位掘削体積あたりの外部コスト試算結果を示す。これより、各工事の外部コストは大きく異なり、開削(12)(13)、シールド(1)(8)(10)(13)(14)(15)が特に高いことが分かる。

図-5に外部コストの構成比率を示す。外部コストが高い開削(12)(13)、シールド(1)(8)(10)(13)(14)(15)は交通規制による外部コスト比率が非常に高く、交通規制がこれらの工事の外部コストが高い原因に大きく影響していることが分かる。

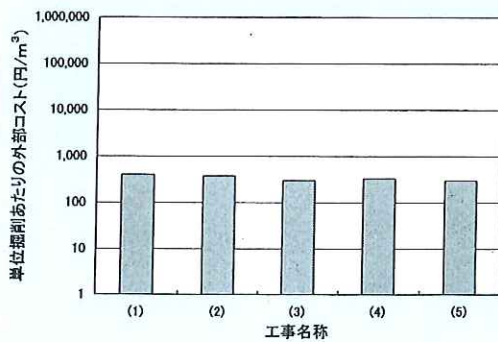
図-6に交通規制が実施された工事のみを対象とした交通規制による外部コスト構成比率を示す。



(a) 開削工法



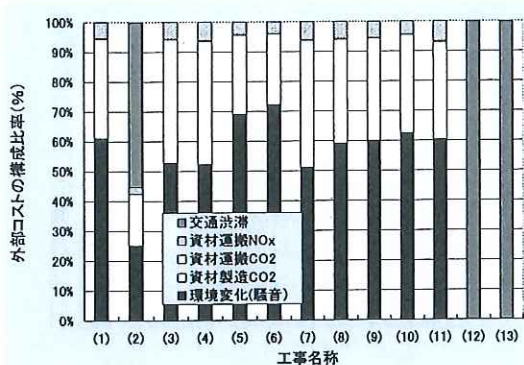
(b) シールド工法



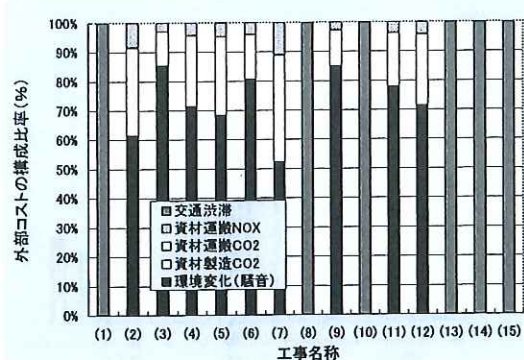
(c) 山岳工法

図-4 単位掘削体積あたりの外部コスト試算結果

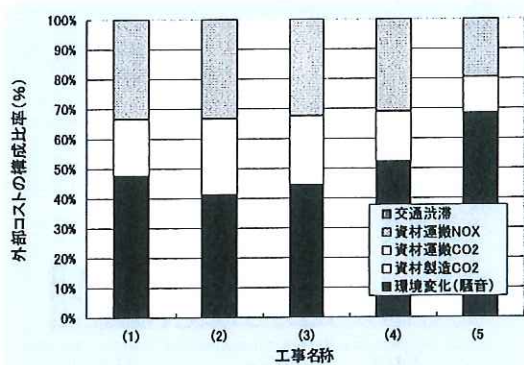




(a) 開削工法



(b) シールド工法



(c) 山岳工法

図-5 各工事の外部コスト構成比率

これより、交通規制による自動車排ガスおよび燃料消費増加による外部コストに比べて道路利用者の時間損失によるコストが大きいことが分かる。

以上より、事例収集トンネルが置かれた条件(交通規制の有無、断面積、土被り等)が異なるために今回の外部コストの試算結果は単純に比較できるものではないが、トンネル施工時に交通規制を伴う場合には、外部コストに与える影響が極めて大きいことが明らかとなった。

#### 4. ケーススタディによる外部コストの試算

外部コストの試算として都市部の道路トンネルを対象としたケーススタディを実施した。土被り、施工延長をパラメータとして NATM、シールド

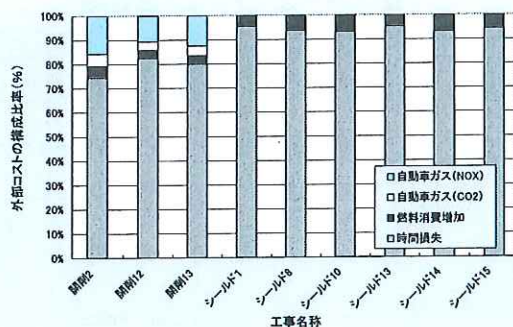


図-6 交通規制による外部コストの構成比率

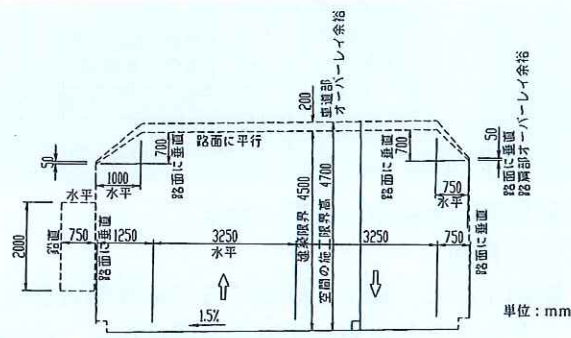


図-7 建築限界

工法、開削工法によりトンネルを建設した場合の建設コストと外部コストを算定し、外部コストを考慮した場合の建設工法の選定方法について検討を行った。

#### 4.1 試算条件

##### ①対象トンネルの規模および検討ケース

対象トンネルの規模は、図-7に示すような建築限界の2車線規模の道路トンネル(上下線)を想定した。ケーススタディは、表-3に示すように NATM、シールド工法、開削工法の3工法について、それぞれトンネル延長、地上部の規制条件、土被りを設定して実施した。図-8に各掘削工法を採用した場合のトンネル断面の例を示す。各条件毎にそれぞれのトンネル工事費および外部コストを算出し、都市トンネルにおいて外部コストを考慮した場合の工法選定について検討した。

##### ②土質条件

土質条件は、大規模な対策や補助工法を必要とすることなく3つの建設工法が検討対象と考えられる地盤を想定した。地下水位はGL付近にあると想定し、NATM施工時の湧水対策は施工場所として都市内を想定していることから、排水工法ではなく止水工法を採用した。

##### ③立坑

シールド工法と NATM を用いて本線トンネルを施工する場合、立坑をトンネル両側に設置した。施工延長はこの立坑を含んだ延長とし、立坑の



表-3 ケーススタディの試算条件

掘削方法	延長 (m)	地上部規制条件	土被り (m)	備考	
開削工法	200 500 1,000	工事区間全線で交通規制(2車線を1車線に規制)	5	土留め: SMW	
			10		
			20		
			30		
シールド工法			40	土留め: 連壁	
			5		200, 500mはシールド機1台で施工、1,000mはシールド機2台で施工
			10		
			20		
30					
山岳工法	40	補助工法: 先受工(AGF)、脚部補強、地盤改良			
	5		補助工法: 地盤改良、脚部補強		
	10				
	20				
30	補助工法: 地盤改良				
40					

設置位置は道路中心位置を想定した。

④交通規制

開削工法は、掘削・構築時は交通規制は行わずに昼施工としたが、土留め中間杭打設、路面覆工設置・撤去時は工事区間全線で2車線を1車線に車線規制を行う夜施工とした。

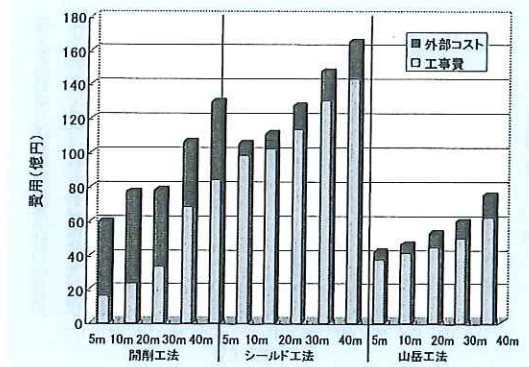
シールド工法と NATM は、立坑工事時に立坑区間で交通規制を行うこととし、開削工法の土留め・中間杭打設、路面覆工設置・撤去、掘削・構築の施工形態と施工時間帯を同じとした。トンネル掘削時は、交通規制は行わない昼夜施工とした。

⑤交通量

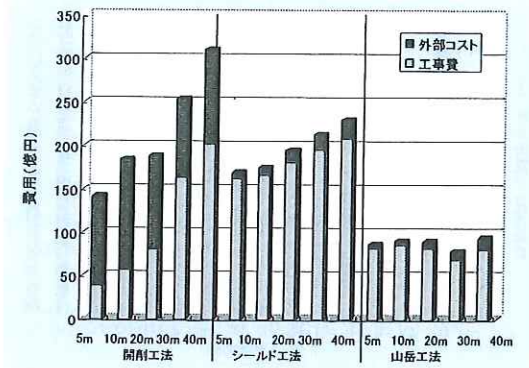
交通量は、約 48,300 台/日 (乗用車約 30,000 台/日、バス 300 台/日、普通貨物 1,000 台/日、小型貨物 16,000 台/日) とした。

4.2 試算結果

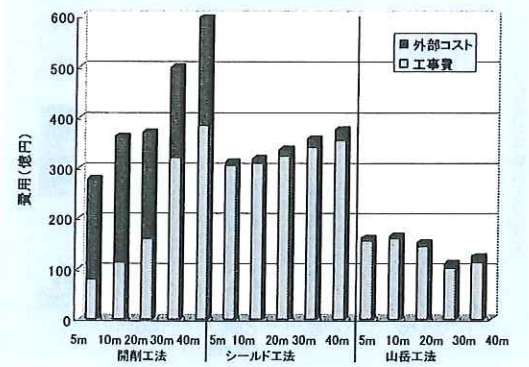
図-9 に試算を行った条件毎の工事費、外部コスト、工事費+外部コストの試算結果を示す。



(a) 延長 200m

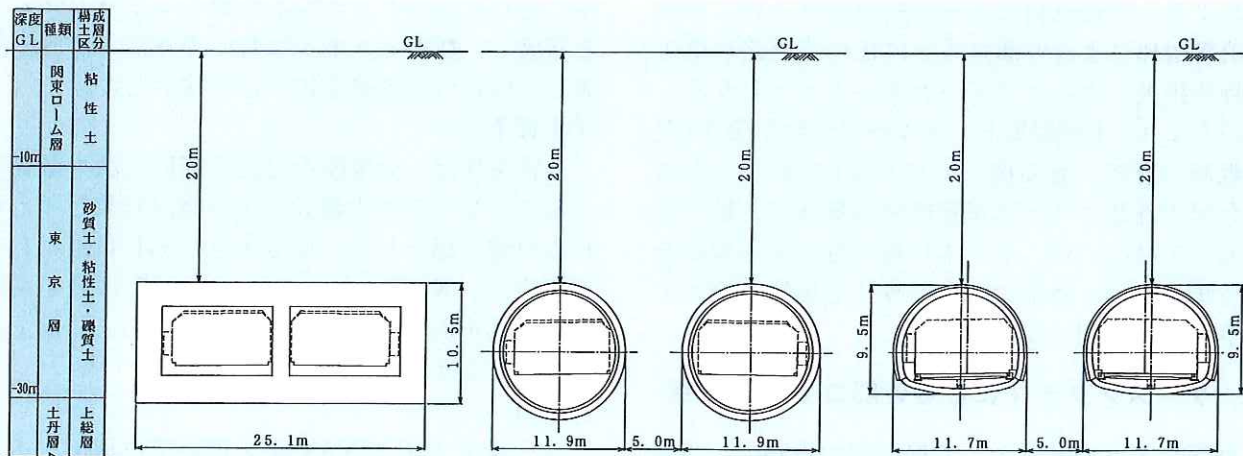


(b) 延長 500m



(c) 延長 1000m

図-9 施工延長別の各施工条件による試算結果



(a) 開削工法

(b) シールド工法

(c) 山岳工法

図-8 設定した各工法のトンネル断面(土被り 20m の場合)



### (1) 工事費

開削工法については土被りが 10m 以下の小さい場合は他の工法に比べて最も安い、他の工法に比べて土被りの増加に伴う増加率が高く、土被りが大きくなると工事費が高くなる。土被り 20m から 30m の間での工事費の増加率が大きいのは土留壁が SMW から連壁になったことによる。

一方、シールド工法は他の工法に比べて全体に高い結果となっている。これは、シールド機等の設備費が大きく影響するためである。また、シールド工法は開削工法に比較して土被りの増加に伴う工事費の増加率が少ないが、延長 200m では土被りが大きくなると工事費の増加率は延長の長い場合に比べて大きくなっている。これは延長が短い場合は、立坑費用が工費に占める割合が高いためである。

NATM は、延長 500m、1,000m では土被り 30m、40m の場合に土被り 20m 以浅に比べて安くなる傾向がある。これは工事費が補助工法採用の程度によって大きな影響を受け、本試算条件では土被りが小さい場合に補助工法を多用することを想定したためである。また、延長 200m の場合はシールド工法と同様に立坑費が占める割合が高いため、延長が長い 500m 以上の場合に比べて土被りが大きくなると工事費の増加率が大きくなっている。

### (2) 外部コスト

外部コストは、開削工法がシールド工法、NATM に比べて高い結果となっている。これは、地上部の交通規制状況が大きく影響したものと考えられる。すなわち、シールド工法、NATM は立坑工事実施時期での限られた区域での交通規制ですむのに対して、開削工法の場合は工事区間全線で長期間にわたって交通規制を必要とするためと考えられる。また、シールド工法、NATM の場合で立坑が交通規制を伴わずに施工できる場所に設けられる場合には外部コストがさらに低くなると考えられる。

### (3) 外部コストを含めた総コスト

外部コストを含めた総コストは、トンネル延長、土被りに関係なく NATM が最も安くなることが分かる。開削工法とシールド工法では、距離が短い 200m の場合は土被りに関係なく開削工法が有利であるが、距離が長い場合は土被りが 20m 以上になるとシールド工法が有利となることが分かる。

## 5. まとめおよび今後の課題

都市トンネルの実工事での外部コストの試算より、以下のことが明らかとなった。

(1) 都市トンネル施工に伴う外部コストとして地上部の交通規制に伴う渋滞が最も影響が大きい。

また、都市トンネルを想定したケーススタディより、以下のことが明らかとなった。

(2) 土被りが浅い場合は工事費では開削工法が最も経済的であるが、外部コストを考慮するとトンネル延長、土被りに関係なく NATM が最も安い。

(3) 開削工法とシールド工法では、工事費では開削工法が経済的であるが、外部コストを考慮すると、ある土被り以上で施工延長が長くなるとシールド工法が経済的となる。

なお、本検討では振動、地下水変動、地盤変状に伴う影響を補償費として外部コストに換算するように考えたが、外部コストとして事前に求めることが重要であり、これらについて各施工法毎に適切な予測手法の確立を図る必要がある。また、本ケーススタディの条件下では、外部コストを含めた総コストがトンネル延長、土被りに関係なく NATM が最も安くなったが、NATM の場合は補助工法の種類・規模・施工方法等の諸条件により直接工事費や外部コストの増加も考えられるため、補助工法の適用条件も含めた検討が必要である。

### 参考文献

- 1) (財)日本総合研究所：道路投資の評価に関する指針(案), 平成 10 年 6 月, pp.45-89.
- 2) 西淳二、清木隆文、加藤貴也、田中正：環境面からの地下鉄建設の評価, トンネルと地下, 1999.11

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 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