

地下施設のコスト分析と評価に関する調査研究

Research on the cost analysis and evaluation of the underground space facilities

村山秀幸※ 松橋良和※※大宮正浩※※※浅野光行※※※

Hideyuki MURAYAMA, Yoshikazu MATSUHASI, Masahiro OMIYA, Mitsuyuki ASANO

Generally, it is considered that the construction and maintenance cost of the underground space facilities is more expensive than the surface facilities. Then, now we get the cost benefit of the underground space facilities at the deep underground law in the megalopolis of Japan. But, it is not easy to estimate the cost analysis of the underground space facilities using the normal methods and techniques for the provision of social infrastructure.

This paper describes the cost analysis from the summarizing existing study results and explaining the case study while constructing the subway based on the summarizing results. We designs the virtual public tunnel (DUG-1:Deep Underground route-1) and estimate the function and benefit of this virtual tunnel.

「Key words」: underground space, cost analysis, tunnel, shaft

1. はじめに

一般に、『地下施設は、地上施設と比較してコスト高になる』と言われている。しかしながら、いわゆる大深度地下法の施行により、都市部の民有地地下の利用が実質的に解禁され、大深度を利用する地下施設は、用地費や維持管理費などを含めた総コストにおいて、地上施設よりメリットがあると考えられるケースが想定される。しかしながら現況では、地下施設のコストに対する定量的かつ具体的な評価・分析方法が確立されておらず大深度の地下利用が促進されずらい状況にあると言える。

本報告では、以上の現況を考慮し地下施設のコスト分析・評価に関する既存文献資料を収集・整理すると共に、その結果を基に地下鉄建設を念頭に置いたコスト比較のケーススタディを実施した。また、最後に、大深度地下利用においてコスト高となる課題を考慮して、大深度地下空間に仮想の供用トンネルを構築する考え方を提案し、その構想に対する効果について考察した。

本調査研究は、土木学会地下空間研究委員会計画小委員会のうち第二ワーキンググループにおける調査研究成果を取りまとめたものである。

「キーワード」 地下空間、コスト分析、トンネル、立坑

※ 正会員 工博 株式会社フジタ 技術センター 土木研究部

※※ 正会員 (株)ドーコン交通部

※※※ 正会員 (株)オオバ 名古屋支店 総合計画部

※※※ 正会員 工博 早稲田大学理工学部土木工学科、教授

2. 地下施設におけるコスト分析・評価の現況調査

2. 1 各事業における事業単価の比較事例¹⁾

ここでは、さまざまな事業における事業単価を試算した事例¹⁾に関して整理する。

表-1に検討対象とした各事業における事業単価を示し、図-1に表-1における事業単価の平均値を円グラフで示す。本事例は、公表されているデータや各所管省庁・事業者へのヒアリング結果を基にし、過去10年以内に竣工あるいは着工した事業のうち都市部において出来るだけ深い地下を利用している事業を選び1km当たりの事業費を算出している。データの制約から、鉄道、道路、河川、下水道事業については、トンネル掘削に係わる費用だけではなく、鉄道では駅部、高速道路では換気塔とインターチェンジ、河川では流入・排水施設、下水ではポンプ施設等を含んだ総事業費で算定している。共同溝、電気、ガス、NTT、上水道、下水道事業については、トンネル掘削に係わる工事費のみであり各施設の費用は含まれていない。以上から、図表における事業単価は、算出条件が異なることおよび、掘削条件や掘削距離などの条件もまちまちであることから、雑ばくな目安値との位置づけである。

高速道路はトンネル径が最も大きく、換気立坑や地上との長いアプローチ道が必要なインターチェンジなどが必要となることからトンネル以外の周辺設備に係わる費用が甚大となっていると考えられる。鉄道は、開削工法で構築する駅部のコストが高く、トンネル部に限れば単価は100億円/km程度といわれている。営団地下鉄における総駅数は154駅であり総営業距離170km(総営業距離)から、約1km毎に一駅設置されている計算となる。

表-2に都心部の地上を利用した場合の事業単価を示す。表-2と表-1を鉄道において比較すると、地上施設が複々線化事業である点が異なっているものの事業単価は、地下、地表共に約300億円/kmと等しくなり非常に興味深いデータとなっている。また、表-2に示した地上における都市計画道路は、道路整備と合わせて市街地再開発事業が予定され費用がかさんでおり、表-1に示した高速道路の事業単価の1.5倍となっている。この事例のように、地上が稠密に利用されている都市部では道路用地の確保が非常に困難で、地下を利用した方が低コストとなることがありうるという。

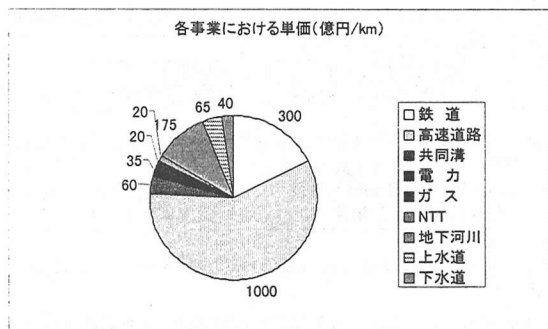
一方、電力事業における17万ボルトを越える超高圧送電線では、送電線下の用地を買収することが義務付けられおり都心部での用地確保は容易でない。

以上の事業単価の比較から、土地利用が稠密な都心部では各種条件によって、地下利用がコスト的に有利となる可能性があることが示唆されるといえる。

表-1 各事業における事業単価¹⁾ (※各事業所管省庁・事業者へのヒアリングによる)

事業種	単価(/km)	根拠
鉄 道	約300億円/km ※トンネル部は100億円/km	295億円/km：半蔵門線、渋谷～押上間、5,016億円/17km 289億円/km：南北線、赤羽岩淵～目黒間、6,191億円/21.4km 295億円/km：名古屋6号線、中村区役所～今池、2,210億円/7.5km
高速道路	約1,000億円/km	1,100億円/km：首都高中央環状線、12,400億円/11km
共同溝	約60億円/km	60億円/km：麻布共同溝φ5.9m、164億円/2.7km 64億円/km：永田町共同溝φ5.9m、64億円/1.02km
電 力	約30～40億円/km	38億円/km：太閤通～名城洞道φ4m、125億円/3.31km 29億円/km：名城～清水口洞道φ4.8m、47億円/1.571km
ガ ス	約10～40億円/km	13億円/km：庄内川横断シールドφ2.1m、35億円/2.7km 35億円/km：南港シールドφ2.4m、60億円/1.7km
NTT	約20億円/km	20億円/km：千葉洞道φ4.5m、36億円/1.8km 17億円/km：大阪幹線洞道φ3.95m、22億円/1.3km
地下河川	約100～250億円/km	243億円/km：環七地下河川(I, II期)φ12.5m、537+560億円/4.5km 122億円/km：葭屋川北部地下河川φ5～10m、1,400億円/11.4km
上水道	約65億円/km	67億円/km：淀の大放水路φ7.5～2m、1,500億円/22.5km
下水道	約40億円/km	37億円/km：春日井送水幹線φ3m、56億円/5.6km

(注) φは内径。鉄道、道路、河川、下水道事業については附帯施設の建設コストを含んだ総事業費。他の事業はトンネル掘削の工事費のみ



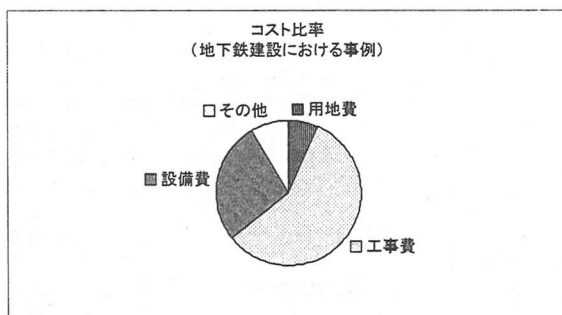
※鉄道、道路、河川、下水道事業については附帯施設の建設コストを含んだ総事業費。他の事業はトンネル掘削の工事費のみ ※値は平均値

図一 各事業における単価比較¹⁾

2. 2 地下鉄におけるコスト分析事例²⁾

ここでは、地下鉄建設における費用項目とコスト分析事例²⁾を整理する。表一3に費目別の建設コストの分析結果を示し、図一2に費用項目(細目)別のコスト比率を円グラフで示す。本事例は、地下鉄建設時におけるコスト分析であり、維持管理費、解体撤去費、再投資費、補償費などは考慮されていない。ただし、その他費用として建設利息を計上している。図表から、

事業費に相当する用地費、工事費、設備費が約 90%を占めており、残りの 10%が建設利息に相当する金利負担である。総事業費に関する記載がないが、金利負担分として建設時の総事業費の 10%が金利負担であることは事業者にとって非常に大きな負担であると考えられる。事業費のうち、約 60%を占めるのが工事費となり、設備費が約 25%、残り約 7%が用地費であることから、トンネルや駅部(開削あるいは立坑)などの施設に係わるコストが高いことが想定される。本事例は、特に大深度地下を利用した施設ではないが地下鉄建設であり、地表における鉄道施設と比較して用地費が少なく工事費の比率が高いと考えられる。また、設備費のうち電気関連費や車両費・車庫費などが鉄道事業における独特の費用項目であり、道路事業などと比較すると設備費の比率が比較的高いことが想定される。



図二 地下鉄建設におけるコスト比率の分析事例

2. 3 トンネル・立坑におけるコスト比較事例^{3),4)}

一般に、地下施設のうち、主に横方向に展開するトンネルと縦方向に展開する立坑におけるコストを浅深度および大深度で比較すると、トンネルに係わるコストはさほど変化がなく、立坑に係わるコストは大きく変動すると言われている。トンネルは深度が深くなるほど掘削対象地盤の強度の向上が期待でき、機械設備などの初期投資が大きくても安定した地盤を掘削することから地盤改良などの補助工法の必要がなく掘進スピードが向上することによって総コストの低減が図られることが期待できる。また、トンネル周辺の地盤強度の向上によってトンネルに作用する土圧が軽減されることが期待でき、シールドトンネルにおけるセグメントと呼ばれる支保構造においても大幅なコストダウンが図られることが期待できる。

一方、立坑では深くなればなるほど山留め壁(例えば、連続地中壁など)に作用する土圧と地下水圧が増大する。よって、立坑規模(径)が大きくなり深度が増すに従って、山留め壁を重構造(幅を厚くし高強度にする)にする必要性があり、施工機械も非常に特殊となることから大幅なコスト増に繋がる。

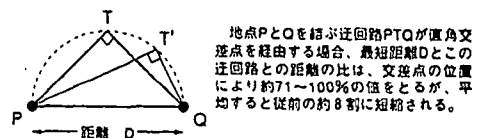
ここでは、トンネルと立坑におけるコスト比較^{3),4)}の事例を整理する。

表－3 費目別建設コストの分析結果(地下鉄建設における事例)²⁾

(文献資料 2)を一部修正)

費 目	細 目	地下鉄建設における費用項目とコスト分析	
		費目(割合%)	概算費用(平均値): バラツキの要因
事業費	用地費	用地費(約 7%)	5～35 億円/km(約 19 億円/km): 用地価格や取得面積等が異なるため
	工事費	土木費(49%) 請負工事費[約 87%] その他費用[約 13%] 測量監督・総係費 (約 10%)	80～170 億円/km(約 118 億円/km): 建築規模, トンネル工法, 駅間距離, 交差物件, 工事の制約条件等が異なるため 12～30 億円/km(約 23 億円/km): 建設・工事監督に携わるのべ人数, 事務所の費用, 路線延長, 交差物件・対外処理の大小等によるため
	設備費	電気関係費(約 10%)	8～15 億円/箇所(約 12 億円/箇所): 一箇所あたりの変電設備の容量がことなるため 3～8 億円/km(約 5.6 億円/km): 受送系統, 配電系統, き電系統, 付帯設備容量が異なるため 4～8 億円/km(約 5.8 億円/km): 列車運行管理装置等の有無や位置, ワンマン運転の実施等がことなるため 7～14 億円/駅(約 11 億円/駅): 換気方式や昇降設備の設置数等がことなるため 1～2 億円/駅(約 1.6 億円/駅): 設置機器数が異なるため 7～12 億円/駅(約 10 億円/駅), 8～17 万円/m ² (約 13 万円/m ²): 駅の規模(建築仕上の範囲)だけでなく, 仕上り方法や仕上り材料が異なるため 0～5 億円/km(約 3 億円/km): 変電所, 事務所や宿舍等の数や規模, 構造などの建設方法が異なるため 140～180 百万円/両(普通車:約 153 百万円/両, リニア:約 158 百万円/両): 購入車両数, MT 比, 車両長, 集電方式, 搭載設備等が異なるため 普通軌道:3～5 億円/km(約 4 億円/km), リニア軌道: 4～6 億円/km(約 5 億円/km): 軌道敷設延長や分岐器数, 防振対策の有無等が異なるため 0～45 億円/km(約 7 億円/km): 既に当該路線内に車庫機能を確保している場合には費用は発生せず, 新規開業路線は将来の輸送力増強を考慮した車庫機能を確保すること, 場合によっては他路線の車庫機能を確保する必要があること等, 路線によって異なるため
		変電設備費[約 15%]	
		電路費[約 20%]	
		信号・通信費 [約 25%]	
		機械設備費[約 35%]	
		駅務機器費[約 5%]	
		諸建物費(約 5%)	
		駅部建築仕上り費 [約 78%]	
		変電所等その他の 地上部の一般建物 関係費[約 22%]	
		車両費(約 5%)	
		軌道費(約 2%)	
		車庫費(約 2%)	
	補償費	—	
維持管理費		—	
解体撤去費		—	
再投資費		—	
その他	利息	建設利息(約 9%)	5～35 億円/km(約 24 億円/km): 資金スキーム, 借入金額, 借入金利, 建設コストが異なるため

大深度地下を利用するメリットとして, 民有地地下の使用制限がないことから, 浅深度地下における地下施設のように道路や公園などの公的用地にルート選定が限定されず, 目的地に対して最も効率的と思われる直線的なルートを設定することが可能となる。よって, この距離の短縮効果を考慮したコスト比較の事例³⁾を以下に述べる。図-3に距離短縮効果の概念図を示す。

図-3 大深度地下利用における距離短縮効果³⁾

この事例では, 延長 5km のトンネルについて以下の条件でコスト比較を実施した。

<コスト試算の条件>

- ・地盤: 東京の地盤, 名古屋の地盤, 大阪の地盤をモデル化して試算
- ・トンネル径: 5m, 10m, 15m についての試算
- ・土被り: 浅深度 20m, 大深度 40m～95m (地盤モデルにより決定) で試算

モデル試算におけるコスト比較を図-4に示す。試算結果から, 東京で土被り 40m 径 15m のケースにおいてコストの増加が最も小さく, 浅深度と比較して 1.05 倍となった。逆に大阪で土被り 75m 径 5m のケー

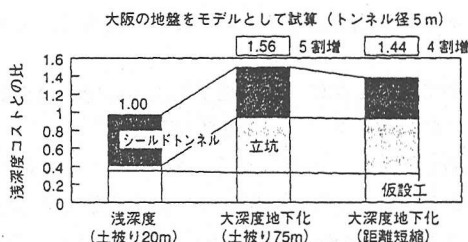
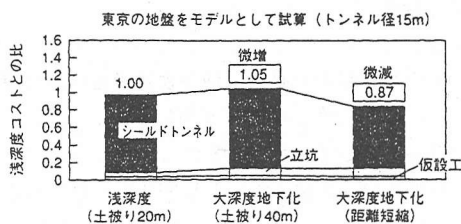


図-4 モデル試算による大深度地下利用におけるコスト比較³⁾

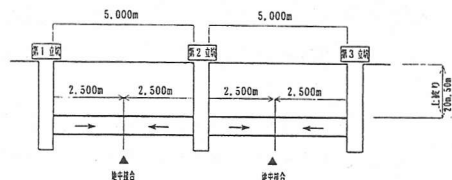


図-5 試算検討モデル⁴⁾

が最もコストの増加が大きく1.56倍となった。この結果は、トンネル径が15mと大きくなった場合と径5mと比較すると当然ながら浅深度・大深度共に総工事費は増大するが、トンネルに係わる工事費の増加は深度にあまり左右されないのに対して、立坑の工事費の増加は規模よりも深度に大きく左右されることを示している。すなわち、浅深度と大深度のコスト比較においては、トンネル規模が小さい方がトンネルと立坑におけるコスト格差が増大する可能性があることが分かる。ただし、東京と大阪の地盤条件を比較すると大阪では深部まで地下水を有する軟弱な地盤が分布することがコスト差を増大させる要因となっていることに注意する必要がある。

ここで、図-3に示した距離短縮効果を約8割と設定して試算すると図-4に示すように、距離短縮効果によりトンネルの工事費が約8割減少し、東京では浅深度と比較して0.87倍、大阪でも1.44倍となる。よって、距離短縮効果を考慮したモデル試算から大深度でも浅深度よりコストが減少するケースがありうることを示されたと言える。

次に、シールドトンネルと立坑において規模と深度をパラメータとして、(社)日本トンネル技術協会がコストをモデル試算した事例⁴⁾を述べる。

図-5に検討モデルを示す。図に示すように、延長10km(4工区)における地下工事を想定して立坑およびシールドトンネル工事における工期・工事費を試算した。地盤条件として、土被り20mでは沖積世砂質土、土被り50mでは洪積世砂質土を想定している。試算は、トンネル断面(S:有効断面積10m²、セグメント内径φ4,200mm、M:有効断面積30m²、セグメント内径φ6,900mm、L:有効断面積80m²、セグメント外径φ10,900mm)と土被り(20m, 50m)をパラメータとして図-6に示すようにまとめている。この試算結果から、地盤条件が同一であれば、いずれのケースにおいてもシールドトンネル工事は『工期・工事費共に土被りによる影響が極めて小さい』ことが分かり、全体の工期・工事費は立坑工事に左右されることが明確に分かる。

トンネル断面	S (有効断面積10m ²)	セグメント径φ4200
トンネル土被り	20m	50m
セグメント外径	4650mm	4650mm
直接工事費		
①立坑工事	(CASE3-2)×3区 =1,074百万円	(CASE3-1)×3区 =4,902百万円
②シールド工事	(CASE-S3.2)×4区 =19,390百万円	(CASE-S2.2.1)×4区 =19,430百万円
合計(①+②)	20,464百万円	24,332百万円
工期		
③立坑工事	(3区間毎工)	(3区間毎工)
④シールド工事	(4区間毎工)	(4区間毎工)
工期(③+④)	2.7年(32.6ヶ月)	3.2年(38.8ヶ月)

(a)トンネル断面Sにおける試算結果

トンネル断面	M (有効断面積30m ²)	セグメント径φ6900
トンネル土被り	20m	50m
セグメント外径	7600mm	7600mm
直接工事費		
①立坑工事	(CASE2-2)×3区 =2,931百万円	(CASE2-1)×3区 =10,278百万円
②シールド工事	(CASE-M3.2)×4区 =41,427百万円	(CASE-M2.2)×4区 =41,627百万円
合計(①+②)	44,358百万円	51,905百万円
工期		
③立坑工事	(3区間毎工)	(3区間毎工)
④シールド工事	(4区間毎工)	(4区間毎工)
工期(③+④)	3.1年(37.6ヶ月)	4.2年(50.0ヶ月)

(b)トンネル断面Mにおける試算結果

トンネル断面	L (有効断面積80m ²)	セグメント径φ10900
トンネル土被り	20m	50m
セグメント外径	11900mm	11900mm
直接工事費		
①立坑工事	(CASE1-2)×3区 =6,942百万円	(CASE1-1)×3区 =24,612百万円
②シールド工事	(CASE-L3.2)×4区 =94,857百万円	(CASE-L2.2)×4区 =96,090百万円
合計(①+②)	101,799百万円	120,702百万円
工期		
③立坑工事	(3区間毎工)	(3区間毎工)
④シールド工事	(4区間毎工)	(4区間毎工)
工期(③+④)	5.0年(60.2ヶ月)	6.6年(79.1ヶ月)

(c)トンネル断面Lにおける試算結果

図-6 トンネル断面と土被りをパラメータとした試算結果のまとめ⁴⁾

3. 地下鉄建設を想定した大深度地下利用のコスト比較の試算

本章では、2章における地下施設の評価・分析事例のまとめを参考として、地下鉄建設を念頭に置いたコスト比較のケーススタディを実施した。

実施したコスト比較における検討ケースとその結果を図-7のようにまとめた。

検討ケースとしては、現況の地表空間と浅深度地下の利用状況を考慮して、地表空間の活用ケース（現状）として『地表 CASE-1：道路として利用』、『地表 CASE-2：鉄道として利用』、『地表 CASE-3：高架として利用』の3ケースを想定した。浅深度地下の活用ケース（現況と新規）としては、『道路下における地下鉄』を想定した。大深度地下の活用ケース（新規）としては、『大深度 CASE-1：既設敷下（道路・鉄道）の大深度地下利用』、『大深度 CASE-2：沿線民地下の大深度利用（一括案）』、『CASE-3：沿線民地下の複合的大深度地下利用（分離案）』として3ケースを想定した。

コスト比較としては、地表面から高架橋にリニューアルするケース、地表から浅深度地下に新規に構築するケース、地表あるいは浅深度から大深度に構築するケースとして3ケース、計5ケースの試算を実施した。なお、ここでは大深度利用の実施例が実質的にはないことから、浅深度から大深度と地表から大深度への展開は同コストと考えた。また、各ケースにおける便益に関して金額換算を実施していないので、本事例におけるコスト比較は雑ばくな目安値との位置づけである。

表-4(a),(b),(c),(d),(e)に各ケースにおけるコストとその算出根拠を示す。各文献資料における試算結果は、その試算モデルが前章で述べたようになり異なるケースも見られるが、ここではあまり細部に拘らず細工しないこととした。

以上から、従来言われているように、浅深度と大深度におけるトンネルのコストは100～110億円/kmと大差ないが、立坑は大深度の方が浅深度より遙かにコスト高で2～3倍となっている。この立坑のコスト高が大深度利用における各ケースのコスト増大の要因となっている。また、沿線民地下の大深度を利用するケース（大深度 CASE-2）では、距離短縮効果を期待でき、既設道路下を利用するより10%程度のコスト縮減が期待できる。しかしながら、立坑のコスト高が要因となりトンネルの距離短縮効果20%がかなり低減している。沿線民地下を一括で利用する場合（大深度 CASE-2）と分離利用するケース（大深度 CASE-3）では、分離利用する方が約15%程度コスト減となる結果となった。このコスト減は、立坑規模が小さくなることが要因であるが、今回の試算では、分離した両トンネル間のアクセスや地表アクセスにおける立坑用地などを考慮していないので、単純にトンネルを分離するとコスト減となるとは考えにくい。

以上の各試算ケースにおいて、その便益を考慮したコスト比較・分析が可能となれば、かなり精度が向上すると考えられる。なお、今回設定した大深度モデルは、特に、『浅深度の空間を確保（担保）する』あるいは、『大深度においてもある空間（既設道路・鉄道下）は確保（担保）する』ことを念頭に置いたモデルであり、かなり現実的なモデルであると考えられる。

4. 仮想の供用トンネルの提案とその効果

前章までの大深度地下におけるコスト構造の検討から、その活用計画において以下が大きな課題となる。

【ハード技術：大深度地下がコスト増となる要因】

○地表アクセス部は、民地、公的施設共に大小様々な施設（電気、ガス、地下道、地下鉄など）が幅輳すると同時に、立坑や駅部などの地上施設の用地を新たに確保することが困難である。

○大深度になればなるほど立坑の築造にコストがかかる。

○供用時の通路（平常時）と避難路（緊急時）の確保に対するコストが甚大となる。

【ソフト技術：評価方法】

○大深度地下の便益を金銭などの貨幣価値あるいはそれに準ずる評価指標を用いた評価手法の開発

ここで、大深度地下の様々な有用性を円滑かつ早期に享受する一つの方策として、図-8に示すような『大深度共同トンネル(DUG-route1:大深度地下国道1)』を想定した。本トンネルは、『大深度地下がコスト増となる要因』を考慮して、地表と同等の機能(資機材の搬出入、掘削土砂の搬出、地下水の処理・搬出、動力・通信の供給、避難路の確保等)を有する施設が大深度地下に、計画時から存在することを想定しており、大深度地下における主要幹線となることから、地表における主要国道をイメージしている。

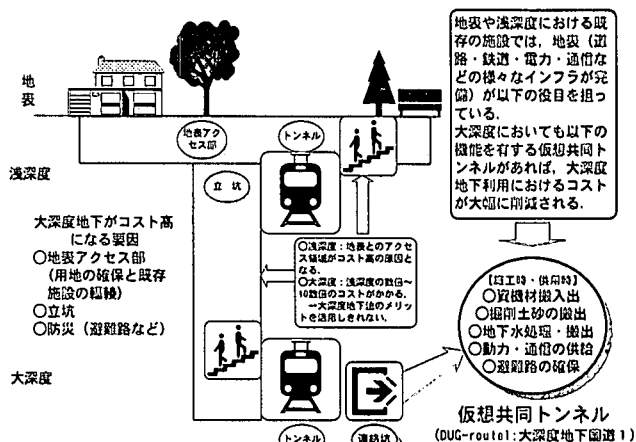


図-8 仮想共同トンネル(DUG-route1)の概念図とその効果

本仮想共同トンネルは、新たな大深度施設の計画に対して連絡坑(横坑や斜坑)によってアプローチすることが可能で、事業者は地表に作業基地を設ける必要性がなく、共同トンネル内における作業基地の場所と範囲を道路占有許可申請のように申請し、技術審査の上で任意形状に拡張できる。さらに、共同トンネル管理者は、資機材の搬出や電力・通信の供給などを地表と同程度のコストで供給し、掘削土砂や地下水(上・下水道と同様)の搬出・処理などの業務を受託することが可能で、緊急時の避難路や緊急避難場所も提供する。本仮想トンネルは、初期投資費用が莫大となるが大深度地下の利用が促進されれば、民間企業においてもその運用が可能と考えられる。また、本仮想トンネルは、以上の機能から首都圏を想定すると、例えばJR山手線の環状部地下において、大深度空間を確保(担保)するために深度100m程度とかなりの大深度でかつ複数の幹線(鉛直と水平展開)である必要性が想定される。

本仮想トンネルは、『地表では当たり前のインフラ設備が何故大深度地下に全く整備されないのか?各事業者がインフラ設備を自前で整備する必要があるのか?』との発想であり、その作用効果は地表以上に甚大で、大深度地下利用における費用が地表より遙かに低コストとなる可能性を秘めている。

5. おわりに

本報告は、地下施設のコスト分析・評価に関する既存文献資料を収集・整理し、その結果に基づき地下鉄建設を念頭においた浅深度地下および大深度地下利用のケーススタディをコスト分析の立場から議論した。また、大深度地下利用がコスト高になる課題を考慮して、仮想の共同トンネルを提案しその効果を検証した。

なお、建設コストは様々な条件によって大幅に変化するので一概に議論できずまた異論も多い。よって、その取扱に関しては十分な議論が必要となるが、本調査研究は、地下空間施設の計画論的な立場からコストの雑ばくな目安値を算出しその有用性を検証したものであり、コストの詳細に関して議論すべき立場にない。

6. 参考文献

- 1)佐藤寿延：大深度地下開発における技術と空間活用に関する研究，京都大学学位論文，2001.
- 2)内山久雄：地下鉄建設のコスト構造の分析，新世紀の都市鉄道サービスの革新に向けて～都市鉄道調査報告シンポジウム～，運輸政策研究機構，2001.3.
- 3)国土庁大深度地下利用研究会編：大深度地下利用の課題と展望-臨時大深度地下利用調査会答申の解説-，ぎょうせい，1998.10.
- 4)社団法人日本トンネル技術協会：大深度地下利用技術小委員会報告書(モデル検討)，平成12年12月