

都市トンネルにおける NATM とシールド工法の比較に関するアンケート調査

結城則行¹・清水則一²・古川浩平³・中川浩二³

¹正会員 工修 山口大学助手 工学部社会建設工学科 (〒755 宇部市常盤台 2557) (現 川崎地質 (株))

²正会員 博(工)山口大学助教授 工学部社会建設工学科

³正会員 工博 山口大学教授 工学部社会建設工学科

都市トンネルを建設する場合、NATM とシールド工法のいずれを選択し、その際に、何を重要視して決定しているかを知るために、トンネルの計画・調査・設計・施工に携わる技術者を対象にアンケート調査を実施した。

まず、全回答に基づき、工法を選択する際にどのような点を重要と考えているかを調べ、両工法の選択の比率を示した。次に、回答者の所属機関や過去に経験した工法、さらに経験年数などが工法の選択にどのような影響を与えるかについて調べた。そして、工法の最終選択に対して各質問項目の回答がどの程度に影響しているかについて、重回帰分析を用いて考察した。

Key Words : urban tunnel, NATM, shield method, investigation by making a questionnaire

1. はじめに

わが国において未固結地山を主とする都市部のトンネル掘削はシールド工法によるものが主体であり、施工実績も多い。一方、山岳トンネルの標準工法であるいわゆる NATM は、補助工法の開発をはじめとする施工技術の向上によって、地山の条件が多少悪くとも施工が可能となり、都市近郊の未固結地山での施工実績も増加しつつある。このような状況のもと、都市トンネルの施工において、NATM かシールド工法かの選択が議論される機会が増してきた。

都市トンネルに関する最近の研究や報告には、比較的中立的な立場^{1)~3)}、やや NATM 側の立場^{4)~6)}、また、ややシールド工法側の立場^{7),8)}から都市トンネルを評価しているものがある。しかしながら、その評価は各個人の経験をはじめとする種々の要因により異なると考えられ、少なくとも現時点では定まっていまいと思われる。

筆者らは、これまで主に山岳トンネルにおける NATM に関連した研究を進めてきた。そこで、NATM を都市トンネルに適用する立場から、NATM とシールド工法とを比較するためにアンケート調査を行った。すなわち、両工法のいずれでも掘削可能と考えられる地山を想定して、トンネルに携わる技術者が都市トンネルにおいて、NATM あるいはシールド工法のどちらを選択するか、また、選択に際して重要視するのはどのような点かを把握することを目的にアンケート調査を実施した。本報告は、そのアンケートの結果をとりまとめ、考

察を加えたものである。

2. アンケートの内容および実施方法

本アンケートは、都市トンネルの特定の現場条件を想定して行うものではないが、アンケートの回答者から具体的な回答を得るために、現実的かつ技術者間で共通の認識が持てるような施工条件を想定した。また、アンケートでは、トンネルの計画から施工、その後の供用段階までを含めた評価要因を取り入れることを念頭に質問項目を設定した。

(1) トンネルの施工条件

アンケートにおいて想定したトンネルの施工条件を表-1に示す。それらは、これまでの都市トンネルの施工事例を参考にして、NATM とシールド工法のいずれの工法によっても施工が可能であるように想定したものである^{1)~8)}。

(2) アンケートにおける質問事項

アンケートの主題質問項目として経済性、施工性、信頼性、社会性および技術力の5項目を取りあげ、さらに各主題質問項目を表-2に示すような4~10の細かい質問項目に分けた。それらの質問項目と各総合評価項目(後述)について、表-1に示した施工条件を想定して、次項(3)に述べるような方法で回答してもらった。そして、回答が回答者の所属機関やトンネルに携わる経験年

表一 想定したトンネルの施工条件

想定項目	想定内容
計画位置	大都市近郊の道路下で土被り10～20m程度、道路両側に店舗や住宅などがある。
地質条件	洪積層に相当する未固結地山（例えば、砂・シルト・粘土互層、切羽はおおむね自立）
地下水条件	掘削位置はおおむね地下水面より下。（地下水対策が可能な条件）
トンネル断面	70～80㎡（直径約10m）程度の鉄道または道路トンネル。
トンネル延長	L=800m程度

表二 アンケート質問項目

主題質問項目	質問項目	項目数
経済性	①事前調査費 ②設計費 ③建設費 ④本設の付帯設備費 ⑤供用後の維持管理費 総合的経済性	5
施工性	①現場工期 ②施工機械の稼働率 ③作業環境 ④機械化・省力化 ⑤適用地山の範囲 ⑥予想外の地質対応 ⑦近接地下構造物対応 ⑧施工の柔軟性 ⑨建設残土の処理 ⑩技能工・熟練工数 総合的施工性	10
信頼性	①線形管理 ②切羽管理 ③工程管理 ④一次覆工体の品質 ⑤施工後の維持管理 ⑥耐震性への信頼性 総合的信頼性	6
社会性	①施工時の騒音 ②施工時の振動 ③施工時の大気汚染 ④用地境界の制約 ⑤既存構造物への影響 ⑤地下水汚染の程度 ⑥地下水回復の程度 総合的社会性	7
技術力	①施工実績 ②施工上の技術レベル ③支援工の完成度 ④技術開発上の課題 設計手法の完成度 総合的技術力	4
個人属性に関する質問項目	①所属機関 ②トンネルに関する経験年数 ③計画・調査・設計・施工に関する経験件数	3

表三 所属機関別にみた回答者数

所属機関	グループ名	回答者数	経験年数による分類		
			11年未満	11年以上	不明
1. 中央官庁、公団		38	22	11	5
2. 鉄道関係	発注者	14	8	6	0
3. 地方公共団体		19	7	11	1
4. 民間建設業	施工者	212	93	106	13
5. コンクリタテ業	調査・設計者	14	8	5	2
6. 地質調査業	設計者	13	8	2	3
合計		310	146	141	23

数の違いによってどのような特徴があるか調べるために、表二の最下段に示すような回答者個人の属性について質問した。そのなかで経験年数は、NATMとシールド工法に関して、それぞれ計画、調査、設計、施工に係った年数を記入してもらった。

(3) アンケートの記入方法

アンケートは、NATMとシールド工法を比較して回答する形式とした。例えば、主題質問項目の一つである経済性において、質問項目「①事前調査費」では、「事前調査費はどちらが安いとお考えでしょうか？」といった質問に対して、NATM、またはシールド工法の方が「やや安い」「かなり安い」「非常に安い」などのような表現で回答できるようにした(図一参照)。さらに、経済性においては「①事前調査費」に加えて「②設計費」から

以下の質問においては、横軸の適当と思われるところに○を付けて下さい。
 ② NATMまたはシールドを計画した場合の両者の経済性についてお聞きします。

ここで言う経済性とは事前調査費、設計費、建設費、付帯設備費、および維持管理費の5項目で、各々地質コンサル、設計コンサル、ゼネコン、メーカーに委託する費用、および事業主の負担金と考えて頂いて結構です。では、宜しくお願いします。

1. 裏顔調査(地質調査)はどちらが安いとお考えでしょうか。

NATMの方が安い ○ シールドの方が安い

非常に かなり やや 同じ やや かなり 非常に

2. 設計費(シールドの場合、シールド機の設計費を含む)はどちらが安いとお考えでしょうか。

NATMの方が安い ○ シールドの方が安い

非常に かなり やや 同じ やや かなり 非常に

6. 総合的にみて経済性はどちらの方が安いとお考えでしょうか。

NATMの方が安い ○ シールドの方が安い

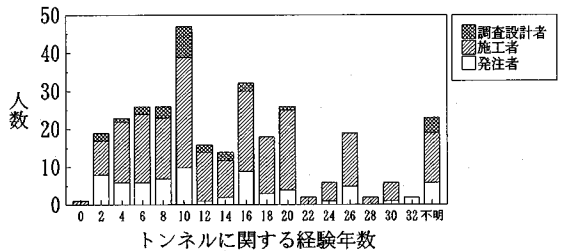
非常に かなり やや 同じ やや かなり 非常に

(最終選択について)
 以上のことから、当初条件のプロジェクトの計画・施工に当たり貴方ならどちらの工法を採用、または推薦されますか。

NATM ○ シールド工法

非常に かなり やや 同じ やや かなり 非常に

図一 アンケート質問項目の一部



図二 回答者のトンネルに携わった経験年数

「⑤供用後の維持管理費」までの質問項目を、NATMかシールド工法のどちらが有利かを答えてもらい、それらの回答を踏まえて、総合的経済性(総合的にみて経済性はどちらが有利か)を判断されるように依頼した(表二参照)。他の主題質問項目(施工性、信頼性、社会性、技術力)に対しても同様の方法で回答を求め、最終的に想定地山に対し、NATMかシールド工法かどちらの工法を選ぶか、そして、その意識の程度(非常に、かなり...など、図一最下段参照)についても併せて答えてもらった。

アンケート記入例の一部を図一に示す。回答は回答選択肢(非常に、かなり、やや...など)のみを選択するのではなく、個人の判断にしたがって回答選択肢間の任意の位置に○印を記入してもらった。

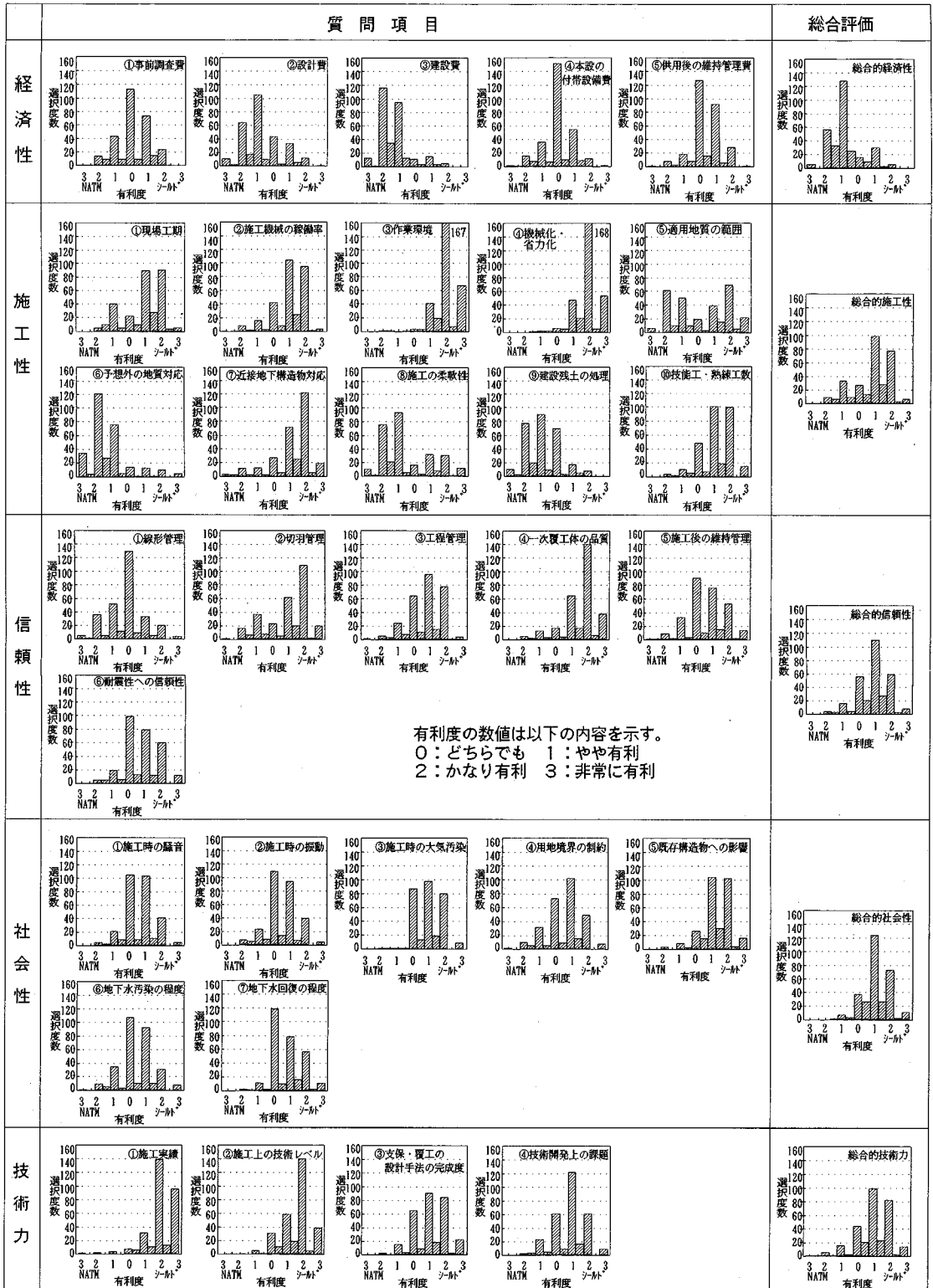
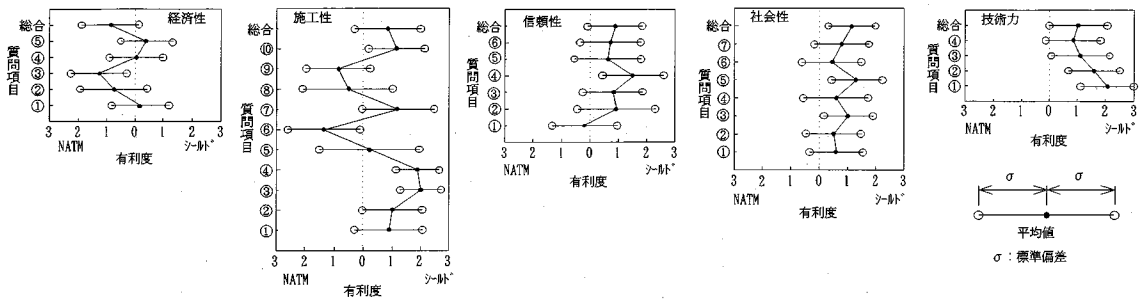


図-3 アンケート回答結果



図一４ 全回答の平均値とばらつき

3. 全回答者に対するアンケート結果

アンケートの回答者は表一３に示すように中央官庁、公団、鉄道関係、地方公共団体、民間建設業、コンサルタント業、地質調査業に所属する専門家で合計 310 名である。アンケートは回答を依頼する一つのグループが 10 名程度となるようにし、ほぼ同数の NATM 担当者とシールド工法担当者に回答してもらった。図一２は、回答者のトンネルに携わった経験年数を示したもので、今回のアンケートでは 10 年前後の経験年数を有する技術者からの回答が多かった。

図一３は全ての回答について経済性、施工性、信頼性、社会性、および技術力における各質問項目毎の回答結果の分布を示したものである。図の横軸は回答を数字で表したもので、NATM あるいはシールド工法を「非常に有利」と考えている場合を 3、「かなり有利」を 2、「やや有利」を 1 とし、「どちらでもない」場合を 0 とした。ただし、回答選択肢の中間に回答のある場合、例えば「やや有利」と「かなり有利」の間に回答されている場合は両者の間をとって 1.5 とした。

まず、経済性については「①事前調査費」、「④本設の付帯設備費」、および「⑤供用後の維持管理費」は両工法とも同じと考えている技術者が最も多く、次にシールド工法がやや有利と考えているものが多い。それに対して、「②設計費」では NATM が「やや有利」、「③建設費」においては NATM が「かなり有利」と回答した人が最も多い。経済性に関する総合的評価（図一３最右欄）を見ると NATM を「やや有利」と回答した技術者が最も多く、全回答者の 80% 以上の技術者が経済性については NATM を「有利」と判断している。

次に、施工性については、「⑥予想外の地質対応」を NATM が「かなり有利」、「⑧施工の柔軟性」、「⑨建設残土の処理」を NATM が「やや有利」と回答した人が最も多い。一方、「③作業環境」、「④機械化・省力化」、「⑦近接地下構造物対応」はシールド工法を「かなり有利」とし、「①現場工期」、「②施工機械の稼働率」、「⑩技能工・

熟練工数」ではシールド工法が「やや〜かなり有利」と答えている。また、「⑤適用地山の範囲」はシールド工法を有利とする回答と NATM を有利とする回答がほぼ同数あり、意見のわかれるところである。総合評価は、シールド工法を「やや〜かなり有利」とする回答が多いが、NATM を「有利」とする回答も 20% 弱である。

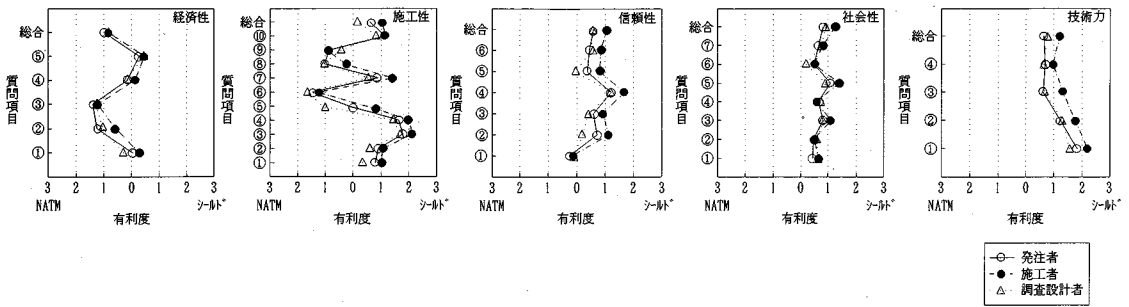
信頼性については、「②切羽管理」、「④一次覆工体の品質」ではシールド工法を「かなり有利」とし、「③工程管理」、「⑤施工後の維持管理」、「⑥耐震性への信頼性」ではシールド工法を「やや有利」とする回答が多い。また、「①線形管理」については、両工法は同程度であるとする回答が最も多い。そして、総合評価はほとんどの回答がシールド工法が「有利」としているが、同程度と考える回答もある。

社会性については、「①施工時の騒音」、「②施工時の振動」、「⑥地下水汚染の程度」、「⑦地下水回復の程度」のように中立的な意見が最も多い項目もあるが、それらの項目も含めて他の項目「③施工時の大気汚染」、「④用地境界の制約」、「⑤既存構造物への影響」はシールド工法を「有利」と考える技術者が多い。特に「⑤既存構造物への影響」を考えたとき、ほとんどの回答者はシールド工法を「有利」と考えていることがうかがえる。したがって、総合評価はシールド工法が有利と判断されている。

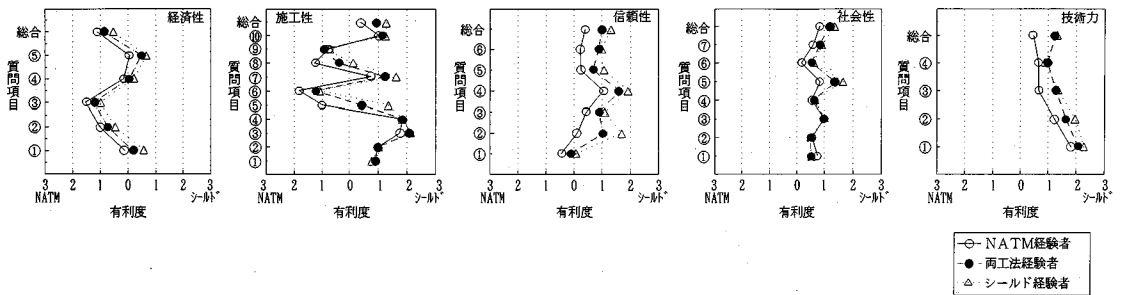
技術力については、「①施工実績」、「②施工上の技術レベル」、「③支保・覆工の設計手法の完成度」、「④技術開発上の課題」のいずれの項目もほとんどの回答者がシールド工法を「かなり有利」および「やや有利」としている。したがって、総合評価もシールド工法を「やや〜かなり有利」と判断している。

以上のように、経済性について NATM が有利とみなしている以外、施工性、信頼性、社会性、技術力のいずれの項目も、シールド工法が有利と考えられている。しかし、施工性において 20% 弱ではあるが NATM を有利と見ている点は注目される。

次に、全回答者について各質問項目に対する平均的な回答および回答のばらつきを調べるために、図一３の横軸の有利度について平均値と標準偏差を求めた。図一４



図一 発注者，施工者，調査設計者の回答の平均値



図一 工法経験別に整理した回答の平均値

にその結果を示す。この図から工法に対する平均的評価と意識のばらつきをみる事が可能となる。ただし、同図の縦軸の数字①，②…は表一2の主題質問項目内の各質問項目につけた番号と対応している。

今、平均値がNATM側で1.0（NATMがやや有利）以上となる項目を挙げると経済性では「③建設費」、施工性では「⑥予想外の地質対応」である。それに対して、シールド工法側で1.0（シールド工法がやや有利）以上の項目を挙げると、施工性では「②機械の稼働率」、 「③作業環境」、 「④機械化・省力化」、 「⑦近接地下構造物対応」、 「⑩技能工・熟練工数」の5項目、信頼性では「④一次覆工体の品質」、社会性では「③施工時の大気汚染」、 「⑤既存構造物への影響」、技術力では「①施工実績」、 「②施工上の技術レベル」、 「③支保・覆工の設計手法の完成度」となる。それらは技術者が、それぞれの工法を推す場合の主な要因と考えられる。

一方、回答の標準偏差はいずれの質問に対してもおおむね1.0であり、特に大きなばらつきはない。ただし、施工性における「⑤適用地山の範囲」、「⑧施工の柔軟性」、については標準偏差が他に比べて大きく、意見にばらつきがみられる。

4. 個人属性による工法選択の特徴

個人属性として、所属機関と工法別のトンネル業務の

経験年数についての回答を得ており、これらの個人属性によるアンケート結果の特徴を調べる。

(1) 所属機関別の選択特性

所属機関は表一3のように6業種を対象としたが、本報告ではそれらを3つのグループに分類する。すなわち、トンネルの計画・管理という観点から中央官庁、公団、鉄道会社および地方公共団体を1つのグループとし、これを発注者と呼ぶ。次に、実際の施工という観点から民間建設業を第2のグループとし、事前調査と設計という観点からコンサルタント業と地質調査業を第3のグループとし、各々施工者、および調査設計者と呼ぶことにする（表一3参照）。以上のように3つのグループを考えると、表一3にみられるように、各々71、212、27の回答数となる。以上のようにグループ化した3つの所属機関別にアンケート結果をとりまとめる。

図一5は、発注者、施工者、調査設計者の3つのグループの回答について、質問項目毎の平均値を示したものである。3者とも、全回答者に対する分析結果と同様、経済性についてはNATMを有利とみているが、他の項目についてはシールド工法を有利と考えている。特に施工者は、いずれの項目に対しても他の2者よりもシールド工法を有利としている（図一5において、施工者の回答は他のグループの回答より右にある）。その傾向は施工性、信頼性、技術力の評価において明瞭にみられる。一

表一 4 工法経験別回答者数

工 法	回 答 数	経験年数による分類		
		11年未満	11年以上	不明
NATM	90	40	47	3
両工法	140	67	58	15
シールド工法	80	39	36	5
合 計	310	146	141	23

方、調査設計者は、全体的にはシールド工法を有利としているが、発注者と比べても、やや NATM よりの回答となっている。

なお、施工性において、「⑤適用地山の範囲」では調査設計者は NATM を「やや有利」、発注者は中立、施工者はいくぶんシールド工法を有利とする平均的的回答を示しており、3つのグループで比較的大きな意識の違いがみられる。また、「⑧施工の柔軟性」では、調査設計者と発注者が、NATM を「やや有利」、施工者は中立の回答を示しており、若干の意識の相違がみられる。このような所属機関の違いによる回答の相違が、前章でみた回答のばらつきの要因と思われる。

(2) 工法経験別による選択特性

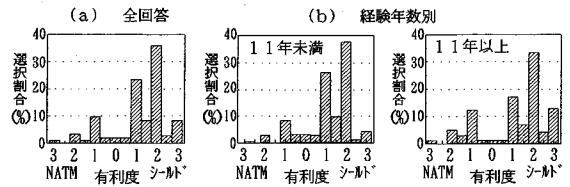
回答者を工法別のトンネル業務の経験年数別にわけると、表一 4 のようになる。今回のアンケート回答者において、NATM 経験者は山岳トンネルの経験が多いが、NATM による都市トンネルも 1 人当たり 1 件程度の割合で経験している。それに対して、シールド工法経験者は都市トンネルのみの業務を主体としており、山岳トンネルの経験はほとんどないようである。

主題項目ごとの質問項目の回答を工法経験別に整理して、回答の平均値を求めると図一 6 のようになる。いずれの項目に対しても、全回答者を対象とした結果(図一 4)と同様の傾向を示しているが、NATM 経験者は NATM 寄りの、シールド工法経験者はシールド工法寄りの回答を与えている。

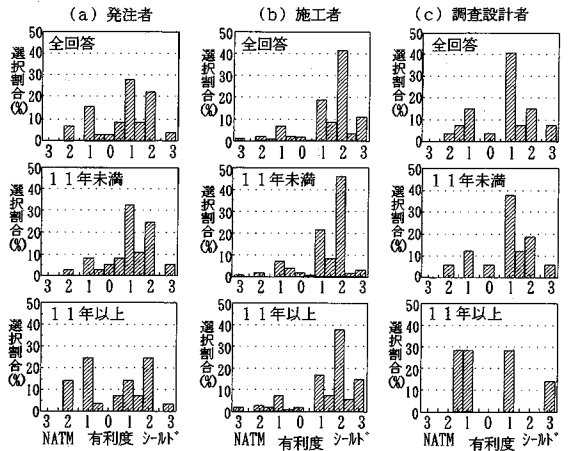
なお、ここでも施工性において「⑤適用地山の範囲」、および「⑧施工の柔軟性」について、工法経験別の 3 つのグループで回答に比較的大きな差があり、この項目に関する認識の相違が見られる。

5. NATM かシールド工法かの最終選択結果に関する考察

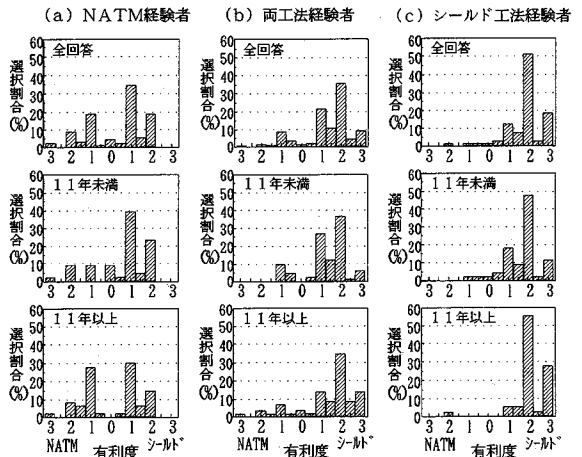
ここでは、最終的に回答者がどちらの工法をどのような理由で選択しているかを、全回答、所属機関別ならびに工法経験別にとりまとめ、それらにどのような特徴があるかを調べる。



図一 7 全回答者と経験年数別に整理した工法の最終選択



図一 8 所属機関別に整理した工法の最終選択



図一 9 工法経験別に整理した工法の最終選択

(1) 全回答からみた選択特性

全回答(図一 7)においては、本アンケートの想定条件に対してシールド工法を、「かなり有利」という程度で選択している。両者の選択割合はシールド工法を選択する技術者が約 80%で、NATM が約 18%である。このことは 3 章でまとめた各質問項目の回答結果を直接反映しているものと考えられる。また、図一 7 (b) に経験年数を 11 年未満と 11 年以上に分けた場合の最終選択結果を

表一5 重回帰分析のモデル1

i	目的変量	説明変量一覽				
	Y_i	$X_{i,1}$	$X_{i,2}$	$X_{i,3}$	$X_{i,4}$	$X_{i,5}$
1	工法選択結果	総合的経済性	総合的施工性	総合的信頼性	総合的社会性	総合的技術力

表一6 重回帰分析のモデル2

i	目的変量	説明変量一覽										
	Y_i	$X_{i,1}$	$X_{i,2}$	$X_{i,3}$	$X_{i,4}$	$X_{i,5}$	$X_{i,6}$	$X_{i,7}$	$X_{i,8}$	$X_{i,9}$	$X_{i,10}$	
1	総合的経済性	事前調査費	設計費	建設費	本設の付帯設備費	供用後の維持管理費						
2	総合的施工性	現場工期	施工機械の稼働率	作業環境	機械化・省力化	適用地山の範囲	予想外の地質対応	近接地下構造物対応	施工の柔軟性	建設残土の処理	技能工・熟練工数	
3	総合的信頼性	線形管理	切羽管理	工程管理	一次覆工体の品質	施工後の維持管理	耐震性への信頼性					
4	総合的社会性	施工時の騒音	施工時の振動	施工時の大気汚染	用地境界の制約	既存構造物への影響	地下水汚染の程度	地下水回復の程度				
5	総合的技術力	施工実績	施工上の技術レベル	支保工の設計手法	技術開発上の課題							

示している。両結果はいずれも全回答とほぼ同様の分布を示しており、この結果においては経験年数のみから回答を特徴づける要素はないようである。

(2) 所属機関別の選択特性

図一8は、発注者、施工者、および調査設計者の所属機関別のグループにおける、工法の最終選択の結果を示したものである。図の上段には各グループの全回答者を対象として結果をとりまとめたもの、また中段および下段は、それぞれ各グループにおいて経験を11年未満と以上に分けた場合の結果をとりまとめたものである。図から発注者ではシールド工法を「やや有利」～「かなり有利」と判断しているものの、NATMが「やや有利」という選択もみられる。このことは、図一5にみられたNATMの経済性の有利さという立場から、発注者はNATMの適用を期待しているのではないかとと思われる。また、特に経験を積んだ回答者（経験11年以上）がNATMを選択する比率が高いことが特徴である。この傾向は調査設計者でも同様である。

一方、施工者ではシールド工法が「かなり有利」という意見が多数を占めている。このことは、図一5に示されているように、特にシールド工法の信頼性と技術力の優位さを考慮していることがその理由と考えられる。

(3) 工法経験別の選択特性

図一9は、NATM経験者、両工法経験者、シールド工法経験者の工法経験別による最終選択の比率を示したものである。同図において工法別の全回答の分布を比較すると（図一9上段）、NATM経験者は他の2グループよりもNATMをやや有利と回答している割合が多いことがわかる。

図一9の中段および下段は、NATM経験者、両工法経験者およびシールド工法経験者の各グループにおいて、経験年数11年未満と以上で分けて、工法の最終選択結果

をまとめたものである。この図からNATM経験者は経験を積みばNATMを選択する回答者が多くなり、経験年数11年以上ではNATMの選択率は50%を越える（図一9(a)中、下段）。シールド工法経験者も経験を積みばさらにシールド工法を有利と考えているようである。しかし、NATM経験者では11年以上の経験者でもシールド工法を有利と考える技術者がいることに対し、シールド工法経験者ではNATMを有利と考える技術者が、ほとんどいないようである。この点は、一般に山岳トンネル経験者においてはNATMの他にTBMなど、掘削機構がシールド工法に近い工法を経験する機会があるのに対して、シールド工法経験者では山岳トンネルを経験する機会がほとんどないことが一因ではないかと考えられる。本アンケートの回答者においても、4.(2)に述べたようにシールド工法経験者には山岳トンネルの経験はなかった。

工法経験別による最終選択結果の共通の特徴は、技術者がどちらの工法を選ぶかは、どちらの工法を経験しているかの影響を大きく受け、また、工事経験年数にも左右されることである。それは長年の経験によってその工法に対して自信と信頼感を持つことが原因ではないかと思われる。

6. アンケート結果の重回帰分析

本章では、工法の最終選択結果に対して各質問項目の回答がどの程度の影響を及ぼすかなどについて、重回帰分析を用いて分析する。

一般に重回帰分析のモデルは次のように表される⁹⁾。

$$Y_i = \sum_j^{N_j} a_{ij} \cdot X_{ij}$$

ただし、 Y_i は目的変量、 X_{ij} は説明変量、 a_{ij} は標準偏回帰係数である。また、 N_j は説明変量の数である。

本章では、重回帰分析にあたり、次の2つのモデルを

表一 7 モデル 1 による重回帰分析結果

(a) 全回答結果			(b) 所属機関別				(c) 工法別経験					
目的変数	説明変数 X_{ij}	標準偏回帰係数 α_{ij}	目的変数	説明変数 X_{ij}	標準偏回帰係数 α_{ij}			目的変数	説明変数 X_{ij}	標準偏回帰係数 α_{ij}		
					発注者	施工者	調査設計者			NATM	両工法	シールド
工法選択結果	①総合的経済性	0.13	工法選択結果	①	0.26	0.11		工法選択結果	①		0.16	
	②総合的施工性	0.25		②		0.28	0.42		②	0.15	0.31	0.26
	③総合的信頼性	0.12		③	0.22	0.13			③			0.41
	④総合的社会性	0.25		④	0.46	0.18			④	0.38	0.28	
	⑤総合的技術力	0.21		⑤		0.25	0.35		⑤	0.29	0.11	

表一 8 モデル 2 による重回帰分析結果

(a) 全回答結果			(b) 所属機関別				(c) 工法別経験					
目的変数	説明変数 X_{ij}	標準偏回帰係数 α_{ij}	目的変数	説明変数 X_{ij}	標準偏回帰係数 α_{ij}			目的変数	説明変数 X_{ij}	標準偏回帰係数 α_{ij}		
					発注者	施工者	調査設計者			NATM	両工法	シールド
総合的経済性	①事前調査費	0.10	総合的経済性	①		0.12		総合的経済性	①	0.29	0.08	
	②設計費	0.07		②		0.10			②			
	③建設費	0.61		③	0.79	0.57	0.88		③	0.27	0.73	0.58
	④本設の付帯設備費			④					④			
	⑤供用後の維持管理費	0.19		⑤		0.23			⑤		0.24	0.30
	⑥現場工期	0.24		⑥	0.26	0.36			⑥		0.33	0.39
総合的施工性	⑦施工機械の稼働率	0.09	総合的施工性	⑦			0.44	総合的施工性	⑦	0.28		
	⑧作業環境	0.08		⑧					⑧			0.23
	⑨機械化・省力化	0.09		⑨	0.27	0.39			⑨	0.22		0.20
	⑩適用地山の範囲	0.19		⑩	0.19	0.22			⑩	0.16	0.14	
	⑪予想外の地質対応			⑪					⑪			
	⑫近接地下構造物対応	0.18		⑫	0.18	0.20			⑫	0.21	0.18	0.21
	⑬施工の柔軟性	0.20		⑬		0.21			⑬			
	⑭建設残土の処理	0.09		⑭		0.11			⑭	0.17	0.29	0.14
	⑮技能工・熟練工数	0.15		⑮	0.19	0.19			⑮	0.27	0.16	
	⑯線形管理	0.13		⑯	0.16	0.10			⑯		0.16	
総合的信頼性	⑰切羽管理	0.16	総合的信頼性	⑰	0.17	0.23		総合的信頼性	⑰	0.23	0.28	
	⑱工程管理	0.19		⑱	0.39	0.07	0.53		⑱	0.17	0.34	0.15
	⑲一次覆工体の品質	0.23		⑲		0.36			⑲	0.20	0.37	0.24
	⑳施工後の維持管理	0.14		⑳		0.16			⑳		0.10	0.24
	㉑耐震性への信頼性	0.32		㉑	0.45	0.24	0.65		㉑	0.48	0.27	0.33
	㉒施工時の騒音	0.14		㉒	0.26	0.11			㉒	0.37	0.27	0.15
総合的社会性	㉓施工時の振動		総合的社会性	㉓		0.34		総合的社会性	㉓			
	㉔施工時の大気汚染	0.06		㉔					㉔			
	㉕用地境界の制約			㉕		0.13			㉕		0.15	
	㉖既存構造物への影響	0.37		㉖	0.37	0.32	0.38		㉖	0.33	0.33	0.41
	㉗地下水汚染の程度	0.14		㉗	0.22	0.13			㉗	0.18	0.23	
	㉘地下水回復の程度	0.34		㉘	0.17	0.39	0.45		㉘	0.31	0.31	0.41
	㉙施工実績			㉙					㉙			
総合的技術力	㉚施工上の技術レベル	0.29	総合的技術力	㉚	0.20	0.30	0.44	総合的技術力	㉚	0.30	0.18	0.38
	㉛支保覆工の設計手法	0.35		㉛	0.46	0.29	0.46		㉛	0.33	0.36	0.28
	㉜技術開発上の課題	0.23		㉜	0.33	0.20	0.27		㉜	0.22	0.28	0.20

考える。すなわち、

- (1)モデル 1：目的変数を工法選択結果とし、説明変数に主題質問項目の総合評価をとる (表一 5 参照)、
- (2)モデル 2：目的変数を主題質問項目の総合評価とし、説明変数に主題質問項目内の質問項目をとる (表一 6 参照)。

ここで、モデル 1 は工法の最終選択に対して 5 つの主題質問項目、すなわち経済性、施工性、信頼性、社会性および技術力がどの程度の影響を与えるかを調べるものである。また、モデル 2 は各主題質問項目の総合評価に対して、各質問項目の回答がどの程度の影響を及ぼすかを調べるものである。

重回帰分析にあたり、説明変数としてとりあげた各質問項目の回答について、NATM を「非常に有利」とする回答には「-3」、「かなり有利」に「-2」、「やや有利」に「-1」を与え、またシールド工法については「非常に有利」には「3」、「かなり有利」は「2」、「やや有利」は「1」と点数化した後、データの基準化⁹⁾を行った。その結果、求められる標準偏回帰係数は、各説明変数が目

的変数の評価に及ぼす影響の程度と解釈される。また、ここではステップワイズ法⁹⁾によって統計的にみて、目的変数への影響が小さい説明変数を除去している。

以下に、全回答、所属機関別および経験工法別のアンケート結果に対して、モデル 1 と 2 を用いて分析する。

(1) 全回答を用いた分析

表一 7 (a) および表一 8 (a) に全回答を対象としてモデル 1 および 2 を用いて重回帰分析を行った結果を示す。ただし、標準偏回帰係数が空欄となっている説明変数は、ステップワイズ法によって除去されたことを示している。

まず、モデル 1 (表一 7 (a)) によると工法選択において「総合的施工性」と「総合的社会性」、続いて「総合的技術力」の標準偏回帰係数が大きく、これらの項目が他の説明変数に比べて工法の最終選択に大きい影響を与えているものと思われる。すなわち、都市トンネルにおいては施工性ととも、周辺環境への配慮 (社会性) が重要であり、それを実現できる技術力の必要性が示唆され

ているように考えられる。

次にモデル2を用いて各主題質問項目ごとの総合的評価に影響を及ぼす要因を考察する(表-8(a))

経済性については「建設費」の標準偏回帰係数が他に比べて非常に大きく、建設費は経済性を判断するための主要な評価要因となっている。このことはトンネルの総事業費に占める建設費の割合が大きいことに起因しているからと思われる。一方、図-3に示されているように、経済性に関する総合評価はNATMが有利と判断されている。したがって、ここで得られた結果は、その判断においてNATMの建設費の有利さが比較的高く評価されていることを示しているものと考えられる。

施工性については、「現場工期」、「施工の柔軟性」、「適用地山の範囲」、「近接地下構造物対応」、「技能工・熟練工数」の標準偏回帰係数が大きく、これらの項目の回答が総合的施工性ではシールド工法が有利(図-3参照)という判断に影響を与えている。なお、「予想外の地質対応」が説明変数として除去されているのは、統計的にみて、総合的施工性の評価(シールド工法有利という判断)に対して、この項目の回答(「予想外の地質対応」に対してはNATMが有利という回答)の影響度が小さいという意味であり、この項目が質問項目として重要でないという意味ではないことに注意する必要がある。

信頼性では、「耐震性への信頼性」、「一次覆工体の品質」の標準偏回帰係数が他の項目に比べて大きく、それらが総合的信頼性はシールド工法が有利(図-3参照)という回答に影響を与えている。このことは「耐震性への信頼性」、「一次覆工体の品質」については、シールド工法の方がNATMよりやや優れているという現状を反映しているものと思われる。

社会性では、「既存構造物への影響」、「地下水の回復の程度」の標準偏回帰係数が、他の項目に比べて大きく、それらが総合的社会性はシールド工法が有利(図-3参照)という回答に影響を及ぼしている。

最後に、技術力は「施工実績」以外の3項目が総合的技術力の評価にほぼ同じ影響度を有している。なお、「施工実績」に対する回答は、「かなり～非常に」シールド工法が有利であるが(図-3最下段「技術力」の項目①を参照)、総合的技術力はシールド工法が、「やや」有利という回答であるために(図-3)、総合的技術力の評価に与える統計的な影響度は小さいため、説明変数から除去されている。ここでも、除去されたからといって「施工実績」が「総合的技術力」の判断において重要でないという意味にはならないことに注意しなければならない。

(2) 所属機関別の分析

モデル1を用いた分析結果によれば(表-7(b))、発注者は「総合的社会性」が工法選択の回答に最も影響を

及ぼしているのに対して、施工者および調査設計者は、両者とも「総合的技術力」、「総合的技術力」の順に工法選択の回答への影響が大きく、「総合的社会性」は工法選択の判断にあまり影響を及ぼしていない。最終的には、発注者と調査設計者はシールド工法をやや有利、また、施工者はかなりシールド工法を有利と判断し、いずれも最終的にはシールド工法を選択しているが、その選択に影響を及ぼす項目が立場により異なっている点は興味深い。さらに、発注者では「総合的社会性」、「総合的経済性」の順で標準偏回帰係数の大きい点は、社会性および経済性を重視する発注者の立場をよく説明しているものと思われる。

次にモデル2を用いて所属機関別の回答を分析すると(表-8(b))、いずれの所属機関も経済性においては「建設費」が最も総合的経済性の回答に影響を与える項目となっている。

施工性では、所属機関別で採用される説明変数が異なっている。これは、図-5に示されるように各質問項目の回答がばらついていることに起因しているものと思われる。「現場工期」の標準偏回帰係数は、発注者および施工者において大きい、調査設計者では、説明変数として採用されていない。また、「機械化・省力化」の標準偏回帰係数は発注者および調査設計者とも大きく、重要な評価要因としているが、施工者では説明変数として用いられない。これらの結果は、所属機関別の総合的施工性の評価に及ぼす影響度の大きい説明変数の内容が大きく異なっていることを示している。

信頼性は、発注者では「耐震性への信頼性」、「工程管理」、施工者では「一次覆工体の品質」、さらに調査設計者では「耐震性への信頼性」、「工程管理」の標準偏回帰係数が大きく、発注者と調査設計者において同じ説明変数が総合的信頼性の回答に大きな影響を及ぼしている。

社会性では「既存構造物への影響」の標準偏回帰係数がいずれの所属機関においても大きく、総合的社会性を評価する上で影響の大きい要因となっている。「施工後の地下水回復」の影響度に関する考慮の度合いは施工者、調査設計者で高いが、発注者ではむしろ「施工中の騒音対策」のほうが影響度が高い結果となっている。

さらに、技術力において標準偏回帰係数が大きいのは、発注者および調査設計者では「支保覆工の設計手法」、施工者では「施工上の技術レベル」である。このことは、設計に携わる発注者と調査設計者と、現場での対応を重視する施工者の立場をそれぞれ表しているものと思われる。

(3) 経験工法別の分析

モデル1を用いた分析によると(表-7(c))、NATM経験者では「総合的社会性」、「総合的技術力」の標準偏

回帰係数が大きく、シールド工法経験者では「総合的信頼性」,「総合的施工性」の標準偏回帰係数が大きい。NATM 経験者の最終的な工法選択の回答(図-9(a)参照)に対しては、社会性および技術力の評価の影響が大きく、また、シールド工法経験者の工法選択には信頼性と施工性の評価の影響が大きい。これに対して、NATM 経験者とシールド工法経験者の中間的な工法選択をしている両工法経験者では、社会性と施工性の評価が大きく影響している。

モデル2を用いた分析結果によると(表-8(c)),まず、経済性では、総合的経済性の評価において、両工法経験者およびシールド工法経験者の判断に「建設費」が最も影響を与えているのに対して、NATM 経験者の判断に「事前調査費」が「建設費」とほぼ同じ程度の影響を与えている。総事業費に占める割合は明らかに建設費の方が事前調査費に比べて高いが、NATM では施工中の地質調査や計測管理は特に重要であり、この点が反映した分析結果になっているものと思われる。

施工性においては、重回帰分析によって採用された説明変量とその標準偏回帰係数が工法経験者別に異なっているところが見られる。まず、標準偏回帰係数が大きい項目は、NATM 経験者では「施工機械の稼働率」と「技能工数・熟練工数」、シールド工法経験者では「現場工期」、両工法経験者では「現場工期」と「施工の柔軟性」であり、それらは、それぞれ各工法経験者の「総合的施工性」の評価に比較的大きな影響を及ぼしている。また、「近接地下構造物への対応」と「施工の柔軟性」は工法経験別によらない共通の影響度の大きい説明変量となっている。

信頼性においては、NATM 経験者およびシールド工法経験者では「耐震性への信頼性」の標準偏回帰係数が最も大きく、両工法経験者では「工程管理」と「一次覆工の品質」の標準偏回帰係数が大きく、それらが総合的信頼性の回答へ大きな影響を及ぼしている。

社会性では、「既存構造物への影響」と「地下水の回復の程度」はいずれの工法経験者においても共通の説明変量で、総合的社会性の評価に及ぼす影響が大きい。それに加えて、NATM 経験者では「施工時の騒音」の評価も総合評価の結果に影響を及ぼすことが示されている。

技術力については、NATM 経験者とシールド工法経験者では「施工上の技術レベル」と「支保工の設計手法」の標準偏回帰係数が大きく、両工法経験者では「支保覆工の設計手法」に加えて「技術開発上の課題」の標準偏回帰係数が大きく、それらがそれぞれのグループで、総合的技術力を評価するために影響の大きい要因となっている。

本章では、重回帰分析を適用してアンケート結果の分析を行ったが、すべての点において明解な解釈が得られ

たわけではない。アンケート結果を分析するにあたっての不明点は、本報告で対象としたような地山条件に対する都市トンネルの施工法の定説がまだ十分に確立されていないため、技術者が明確な根拠にしたがい回答することが困難であったことにもよるものと思われる。ここでは上に述べた状況を考慮して、統計的な立場から得られた結果をできるだけありのままのかたちで述べた。

7. まとめ

本報告は、都市トンネルにおける NATM とシールド工法とを比較するために、トンネルに携わる技術者を対象にアンケート調査を行い、都市トンネルに NATM を適用する立場から、その結果について分析した。本報告で得られた知見を以下にとりまとめる。

本報告で想定した都市トンネルを対象とした場合、

(1) 全回答による分析においては現状では経済性に関しては NATM がかなり有利と見られているが、他の項目はシールド工法がかなり有利と認識されている。

(2) 工法の最終選択において、NATM の選択率が約 18%、シールド工法の選択率が約 80%であった。しかし、NATM 経験者のうち、経験年数が 11 年以上の回答者は、NATM を選択する割合が 50%を越えた。

(3) グループ別に選択特性を分析すると所属機関別の選択特性において、施工者が発注者よりシールド工法を有利とみる立場、調査設計者が発注者よりやや NATM 側の立場をとっていることが示された。

(4) 工法別経験による分類においては、NATM 経験者、両工法経験者およびシールド工法経験者で選択特性に相違が見られ、過去の工事経験が選択特性に大きく影響を及ぼすことが示された。

(5) 重回帰分析を行って、工法選択に及ぼす主題質問項目の回答の影響、および、各主題質問項目の総合評価に及ぼす質問項目の回答の影響について統計的な立場から検討し、おおむね 3~5 章で考察した内容と対応する結果を得た。

本報告では多くのアンケート回答を得たが、その一つ一つの回答についての詳細な分析は行わず、一般的な傾向を把握することを目的に結果をとりまとめた。また、アンケートの回答者の所属に片寄りがあるため、分析結果にその影響が含まれている可能性もあることも指摘しておきたい。

謝辞：本研究において、アンケートに御協力頂いた中央官庁、公団、鉄道会社、地方公共団体、民間建設業、コンサルタント業および地質調査業の技術者の方々に深く感謝いたします。また、アンケートの作成に当たっては、肥後満朗氏、鍛冶茂仁氏ならびに多田幸司氏に貴重なご

意見を頂きました。さらに、アンケート結果の整理は山口大学工学部の学生 伊藤克弘君（現（株）奥村組）に、図表のとりまとめには同大学技官 坂尾和男氏に協力頂きました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 吉村恒：トンネル(NATM, シールド), 土と基礎, Vol. 37, No. 383, pp.65-69, 1989.12.
- 2) トンネル工学委員会技術小委員会都市トンネル設計検討部会：NATMとシールド工法の境界領域に関するシンポジウム, 土木学会論文集, 第427号/VI-14, pp.23-40, 1991.3.
- 3) 桜井春輔：シールドと山岳トンネル工法の境界を目指すトンネル工法の開発, 土と基礎, Vol. 41, No. 5, pp.7-12, 1993.5.
- 4) 國見宏, 河田孝志：都市 NATM の切羽安定について, 土木学会論文集, 第421号/VI-13, pp.253-262, 1990.9.
- 5) 都市 NATM ワーキンググループ：都市トンネルにおける NATM の適用に関する研究について, 鹿島学術振興財団助成研究昭和59年度報告書, pp.3-13, 1985.6.
- 6) 桜井春輔, 足立紀尚：都市トンネルにおける NATM, 鹿島出版会, 1992.4.
- 7) 山本稔：シールド工法の動向, 土と基礎, Vol. 41, No. 5, pp.1-6, 1993.5.
- 8) JTA 研究開発委員会シールド工法調査小委員会：シールド工法の都市トンネルへの適用性に関する調査報告, トンネルと地下, Vol. 19, No.10~12, 1988.
- 9) 奥野忠一, 久米均, 芳賀敏郎, 吉澤正：多変量解析法(改訂版), 日科技連, 1983.

(1994.8.24 受付)

QUESTIONNAIRE SURVEY ON THE NATM AND THE SHIELD METHOD FOR CONSTRUCTING URBAN TUNNELS

Noriyuki YUKI, Norikazu SHIMIZU, Kohei FURUKAWA
and Koji NAKAGAWA

A questionnaire on urban tunneling methods was conducted to investigate how engineers understand the applicability of the NATM and the shield method to constructing urban tunnels. From 310 answers to the questionnaire, reasons for adopting the NATM or the shield method were revealed. It was found that the occupation and experience of engineers have affect on deciding a tunneling method. Finally, the linear multiple regression model was used to evaluate the answer of the questionnaire quantitatively.