

土被り厚を考慮した 中国地方のNATM施工実績に基づく トンネル事前設計に関する研究

THE CONSIDERATION OF OVERBURDEN DEPTH FOR PRELIMINARY TUNNEL DESIGN STAGE BASED ON THE COMPREHENSION OF NATM DATA OF CHUGOKU DISTRICT

山田章裕*・保岡哲治**・徳舛幸隆***・重田佳幸****・進士正人*****・中川浩二*****

Akihiro YAMADA, Tetsuharu YASUOKA, Yukitaka TOKUMASU,
Yoshiyuki SHIGETA, Masato SHINJI and Koji NAKAGAWA

Using comprehensive data of mountain tunnels in Chugoku district constructed by NATM, the relation between overburden depth and support pattern was organized into three groups concerning on the type of rock mass, namely granite, slate, schist. A detailed analysis of each group was taken aiming to obtain a method for estimation of construction cost. The proposed method was carefully examined for its validity in practical use for tunnel design at preliminary stage.

Key Words: NATM, depth of overburden, geological investigation, ground evaluation, ground type

1. はじめに

山岳トンネルの設計・施工は、地山条件に大きく左右される。地山条件は、地質、岩盤強度、風化、変質、亀裂の状況、湧水の状況、地質構造などの多くの要素に支配される。そのため、トンネル設計を行うためには、これら地山条件を的確に把握する必要がある。しかし、トンネルは、地中に建設される線状の構造物であることから、全線にわたっての精密な調査は、技術的かつ経済的に難しい¹⁾。

一方、事業の計画段階から施工に至るまでのコスト縮減や公共事業に関する透明性向上の観点から設計段階と施工段階の地山評価の食い違いが議論されており、これまで以上にトンネル計画段階、設計段階における概算費用の精度の良い積算が求められている²⁾。

我が国の地山は、複雑であると一般的に言われている。また、トンネル切羽ごとに地山の状況は、大きく変化するケースに遭遇するとしばしば言われている。しかし、同地域にある同種の岩種からなる地山においては、トンネル掘削に対してよく似た地山挙動を示すことも事実である。また、このことはトンネルの支保設計と概略工事費の積算を前提とした大まかな地山評価として捉えるならば、特定の地域での特定の岩種の施工実績をもとにトンネル地山の推定を行う可能性が考えられる。

本研究では、トンネル計画段階または事前設計段階において、概算工事費の算出方法を提案することを目的として、土被り厚の観点から施工支保パターンの実績を整理・分析し、提案した手法の精度について検討を行った。なお、本研究においては、事前設計の主たる目的を工事費の把握と位置づけており、中国地方で施工された山岳トンネルのうち同一地域、岩種と考えられるトンネル群に限定した場合の概算工事費の算出手法を提案するものである。

* 学生会員 山口大学大学院 理工学研究科 博士前期課程
** 正会員 (財)先端建設技術センター 先端技術研究所 主任研究員
*** 正会員 日本道路公団中国支社 建設部 調査役
**** 正会員 山口大学 工学部社会建設工学科
***** 正会員 山口大学 工学部社会建設工学科

表-1 対象トンネル概要

トンネル名	施工地域	トンネル延長(m)	最大土被り(m)	主岩種
a	山口	1,800	126	黒色片岩
b		857	68	緑色片岩
c		2,015	176.8	黒色片岩 石英閃緑岩
d		1,582	148	黒色片岩
e		1,232	102	黒色片岩
f		405	50.5	黒色片岩 緑色片岩
g	広島	872	143	花崗岩
h		698	125	花崗岩 砂岩
i		247	39	花崗岩
j		1,384	112	花崗岩 珪長岩
k		1,673	65.8	花崗岩
l	岡山	441	88	粘板岩
m		475	78	粘板岩 砂岩
n		1,100	139.9	粘板岩 砂岩
o		1,327	181.1	粘板岩 砂岩
p		3,197	276.5	粘板岩 砂岩

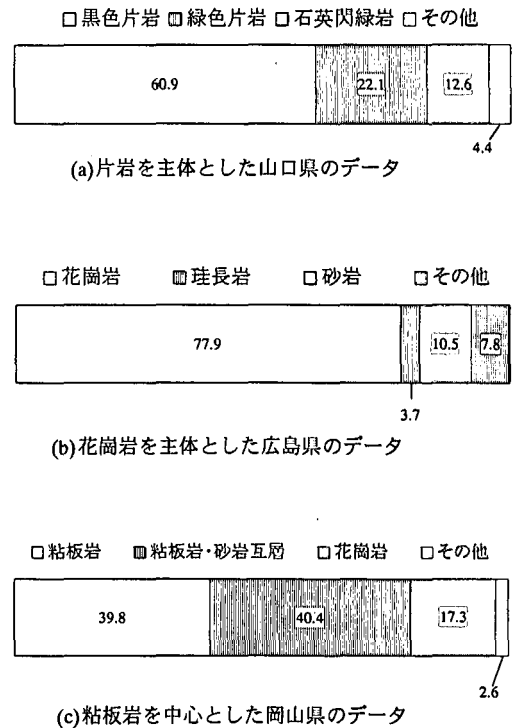


図-1 対象としたトンネルの構成岩種

2. 土被り厚からみた設計・施工実績の分析

2.1 対象トンネルの概要

中国地方の代表的な岩種としては、片岩、花崗岩、粘板岩が挙げられる。本研究では、この3種の岩石について山陽自動車道のトンネル施工実績を検討した。表-1に対象としたトンネルの主岩種、トンネル数、総延長、施工場所を示す。これらのトンネルは、すべて高速道路トンネルであり、地域ごとにほぼ連続的に位置している。図-1に対象としたトンネルの構成岩種を示す。なお、これらのトンネルは全て双設トンネルであるが、ここでは、データの揃っている方を採用した。

(a) 片岩を主体とした山口県のデータ

山口県内の6トンネルを対象とし、総延長は8,219mである。岩種構成は、約8割が黒色・緑色片岩で、片理面が支配的な不連続面となる層状構造である。

(b) 花崗岩を主体とした広島県のデータ

広島県内の5トンネルを対象とし、総延長は4,874mである。岩種構成は、8割弱が広島型花崗岩であり、残りを珪長岩、砂岩、粘板岩が占める。広島型の花崗岩は、中生代白亜紀以降に形成され、九州から中国・四国地方の西南日本に広く分布する中国地方の代表的な岩種である。

(c) 粘板岩を主体とした岡山県のデータ

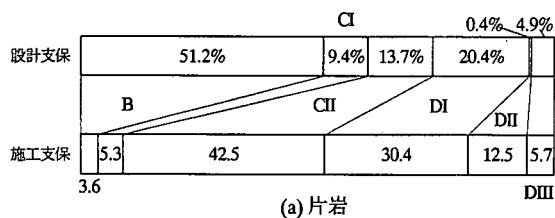
岡山県内の5トンネルを対象とし、総延長は6,540mである。構成岩種は、粘板岩と砂岩・粘板岩互層が8割を占める。粘板岩は、地質年代的には中生代に形成された地質を対象としている。

2.2 事前設計と施工における支保パターンの相違

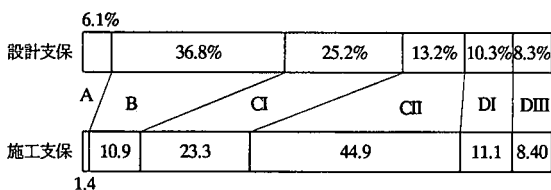
弾性波探査、地表踏査、ボーリングなどの事前調査結果をもとに設定する事前設計時の支保パターンと土木技術者が切羽観察記録、各種計測結果などをもとに設定する施工時の支保パターンについて比較した。

まず、設計時と施工時の支保パターンの変更状況を確認するため、岩種別に支保パターンをA～DIIIの7段階に分けて採用された延長で整理した。図-2に岩種毎の設計・施工支保パターンの構成比率を示す。

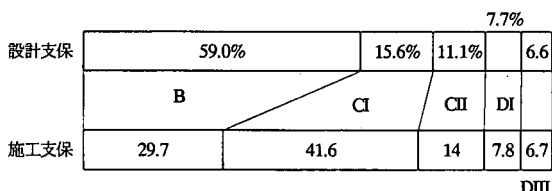
図-2(a)に示す片岩の場合、事前設計における支保パターンは、Bパターンが多く、延長に対して51.2%を占めてい



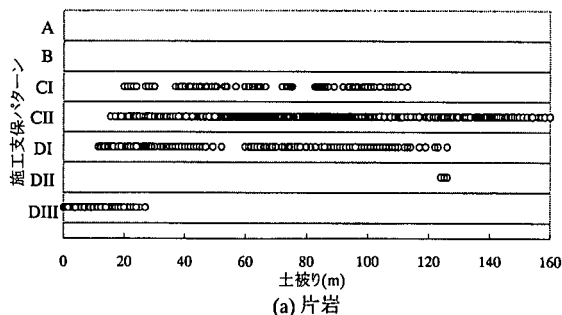
(a) 片岩



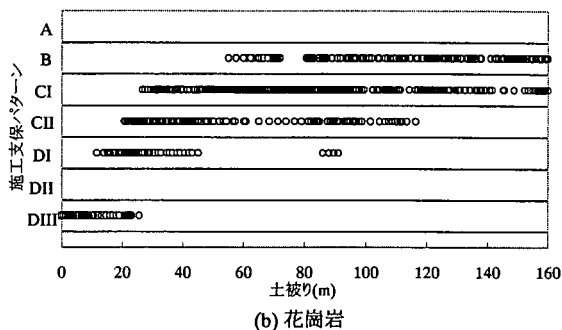
(b) 花崗岩



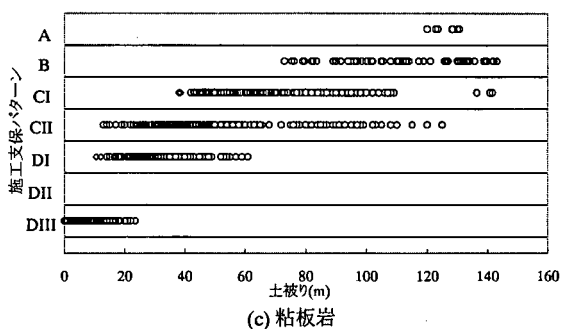
(c) 粘板岩



(a) 片岩



(b) 花崗岩



(c) 粘板岩

図-2 岩種毎の設計・施工支保パターンの構成

図-3 土被りと施工支保パターンの関係

る。しかし、施工時の支保パターンは、延長比率で47.6%減少し、CII、DIパターンの採用比率が40%程度増加している。

次に図-2(b)に示す花崗岩の場合、事前設計における支保パターンは、B、CIパターンが多く60%程度みられるが、施工時の支保パターンではBパターンが25%程度減少し、CIIパターンが30%程度増加している。

図-2(c)に示す粘板岩の場合、事前設計における支保パターンは、Bパターンが60%程度であるが、施工時の支保パターンは、CIパターンが25%程度増加する。

以上より3岩種に共通して言えることは、施工時の支保パターンは事前設計における支保パターンよりも、重い支保を採用するケースが多くなっていることである。

2.3 土被り厚からみた支保パターンの採用傾向

土被り厚と施工支保パターンの関係を図-3に示す。DIIIパターンは、一般的に坑口部に用いられ、各岩種で共通して土被り厚30m以下で施工されている。

図-3(a)に示す片岩では、施工支保パターンの採用範囲は、CI～DIパターンが土被り厚120m程度までの範囲で採用され、CIIパターンについては土被り厚160m程度まで採用されている。一方、図-3(b)に示す花崗岩ではDIパターンの採用が60m程度まで、図-3(c)に示す粘板岩では、40m程度まで採用されており、片岩に比べると花崗岩と粘板岩は、低い土被りの範囲で用いられている。また、花崗岩では、CIパターンが土被り40mから採用されており、片岩に比べると深い土被り厚のとき採用されていることがわかる。

土被り厚と支保パターンとの採用傾向を岩種別に比較すると、片岩の場合には、土被り厚が増加しても採用された支

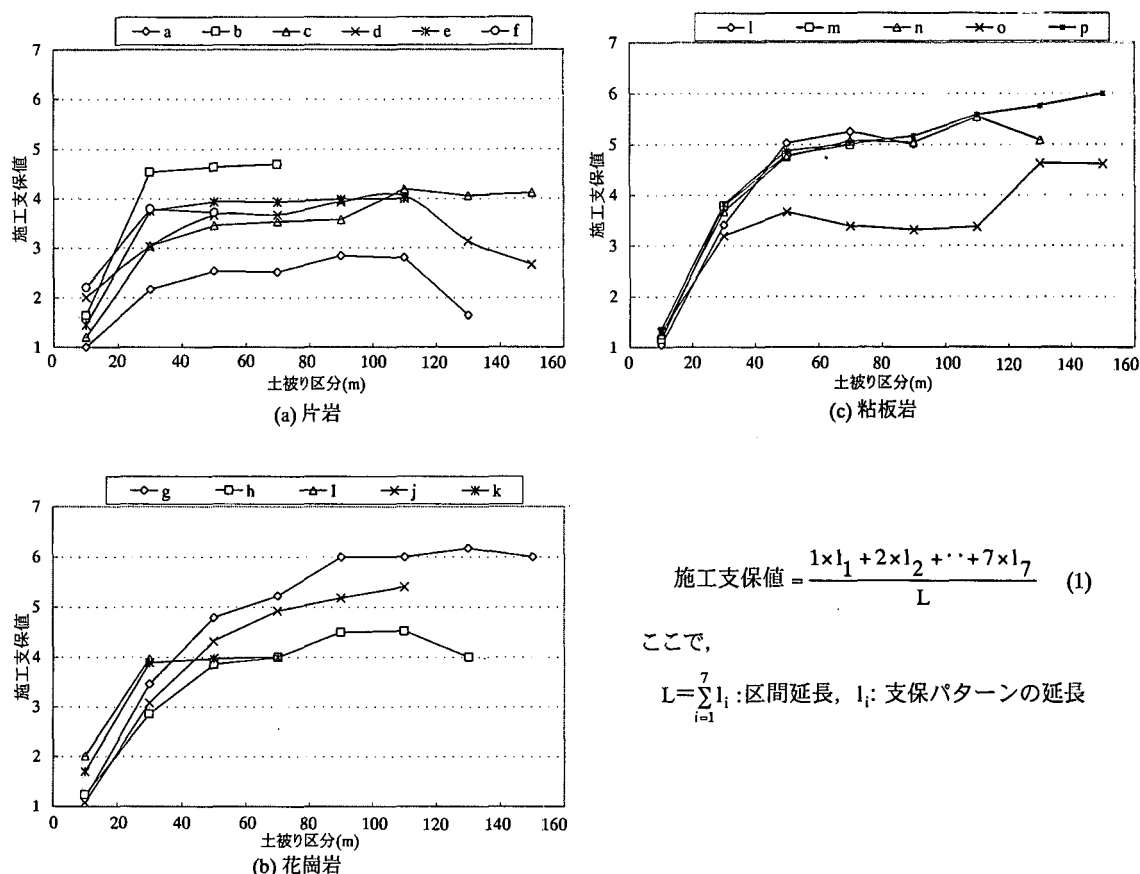


図-4 各トンネルと施工支保値の関係

保パターンは一定であるのに対して、花崗岩では、土被り厚の増加する方向に対して軽い支保パターンが採用されている。粘板岩は片岩の傾向に似かよっているものの、採用される支保パターンは片岩より1ランク軽い支保パターンが採用されている。このように、土被り厚と採用された施工支保パターンには、岩種ごとに特徴があると考えられる。

2.4 土被り厚からみた各トンネルの支保パターンの採用傾向

図-3に示した施工支保パターンにおける土被り厚ごとの採用傾向をトンネルごとに比較するため、一定土被り区間における支保量を点数化する「施工支保値」を定義した。

施工支保値は、支保を連続的なものと考えて、DIII～Aパターンを1～7の数値に置き換え式(1)により算出する。

図-4に各トンネルにおける土被りごとの施工支保値の分布を示す。図-4(a)に示す片岩の場合、土被り20m以下では、各トンネルの施工支保値は1ポイント差であるが、それ以上では、施工支保に3ポイントの幅がある。土被りが増加すると、2ポイント程度の幅となる。土被り増加方向にみると施工支保値の最大値は、施工支保値4程度である。

図-4(b)に示す花崗岩の場合、土被り0～60mまでの傾きが大きく、トンネル間の施工支保値の差も1ポイント以内である。土被りが増加しても、差は2ポイント程度である。土被り増加方向にみると施工支保値の最大値は、施工支保値6程度である。

図-4(c)に示す粘板岩の場合、oトンネルを除き、1ポイント程度の差で収まっていることがわかる。土被り増加方向にみると施工支保値の最大値は、施工支保値6程度である。

岩種毎の施工支保値には、かなりのばらつきはあるものの、土被り厚が大きくなることにより支保が重くなる傾向が花崗岩、粘板岩にはみられた。また、施工支保値に着目してみると、土被りが大きくなると施工支保値6程度まで増加する花崗岩、粘板岩と施工支保値4程度の片岩に分けることができる。

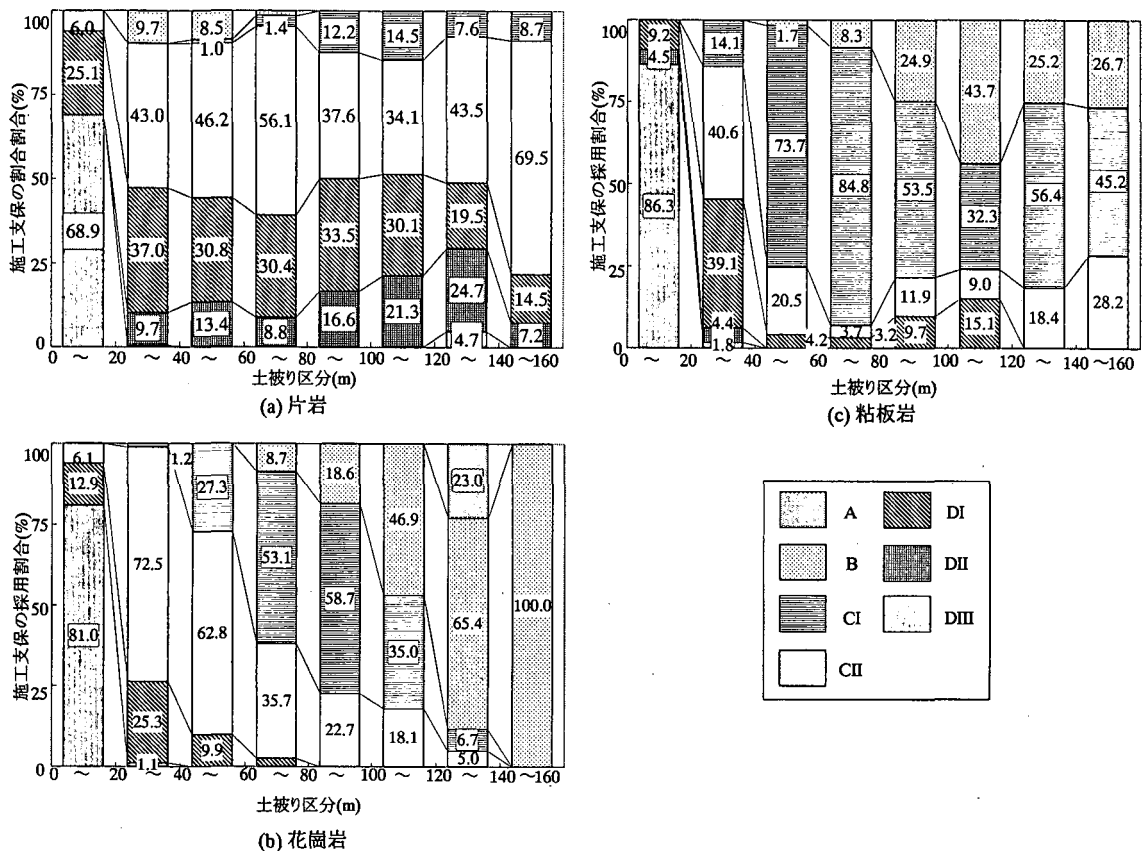


図-5 施工支保パターンの延長割合

表-2 土被り区分と支保パターンの割合の関係(片岩)

施工支保 土被り(m)	DIII	DII	DI	CII	CI	B	A	合計
0~20	69.0	0.0	25.0	6.0	0.0	0.0	0.0	100.0
20~40	1.0	9.0	37.0	43.0	0.0	10.0	0.0	100.0
40~60	0.0	13.0	31.0	46.0	1.0	9.0	0.0	100.0
60~80	0.0	9.0	30.0	56.0	4.0	1.0	0.0	100.0
80~100	0.0	17.0	33.0	38.0	12.0	0.0	0.0	100.0
100~120	0.0	21.0	30.0	34.0	15.0	0.0	0.0	100.0
120~140	4.7	24.7	19.5	43.5	7.6	0.0	0.0	100.0
140~160	0.0	7.0	15.0	69.0	9.0	0.0	0.0	100.0
160~180	0.0	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0	100.0

2.5 土被り区分毎の施工支保の割合

次に各岩種における土被り20mごとの施工支保パターンの延長割合を図-5に示す。

図-5(a)に示す片岩は、土被り20~120mでは、CIIパターン、DIパターンが多く、その割合は変わらない。

図-5(b)に示す花崗岩は、土被り20~60mではCIIパターン、60~100mではCIパターン、100m以上はBパターンが主体となっており、土被り厚の増加に伴い軽い支保パターンが採用されていることがわかる。

図-5(c)に示す粘板岩は、20~40mではDIパターン、CIIパターンが40%程度採用されているのに対して、60m以深はCIパターンが主体となり、100m以上は、B~CIパターンまで幅広く採用されている。

また、各土被り区分において採用割合が多い上位2つの支保パターンで70~80%を占めることがわかる。

表-3 支保パターンの延長計算例
(aトンネル DIIIパターンの場合)

土被り 区分(m)	延長(m)	DⅢの 割合	各土被り区分 の延長(m)
0～20	27.1	0.69	18.70
20～40	148.2	0.01	1.48
40～60	413.7	0.00	0.00
60～80	153.8	0.00	0.00
80～100	616.7	0.00	0.00
100～120	414.2	0.00	0.00
120～140	25	0.05	1.18
140～160		0.00	0.00
160～180		0.00	0.00
合計	1798.7		21.4

表-4 概算工事費の算出
(aトンネル)

支保 パターン	延長(m)	単価 (百万円)	工事費 (百万円)
DⅢ	21.4	2.0	42.8
DⅡ	279.0	1.8	502.2
DⅠ	568.6	1.6	909.8
CⅡ	727.8	1.4	1018.9
CI	148.3	1.2	148.3
B	53.6	1.0	53.6
A	0.0	0.8	0.0
合計	1798.7		2675.6

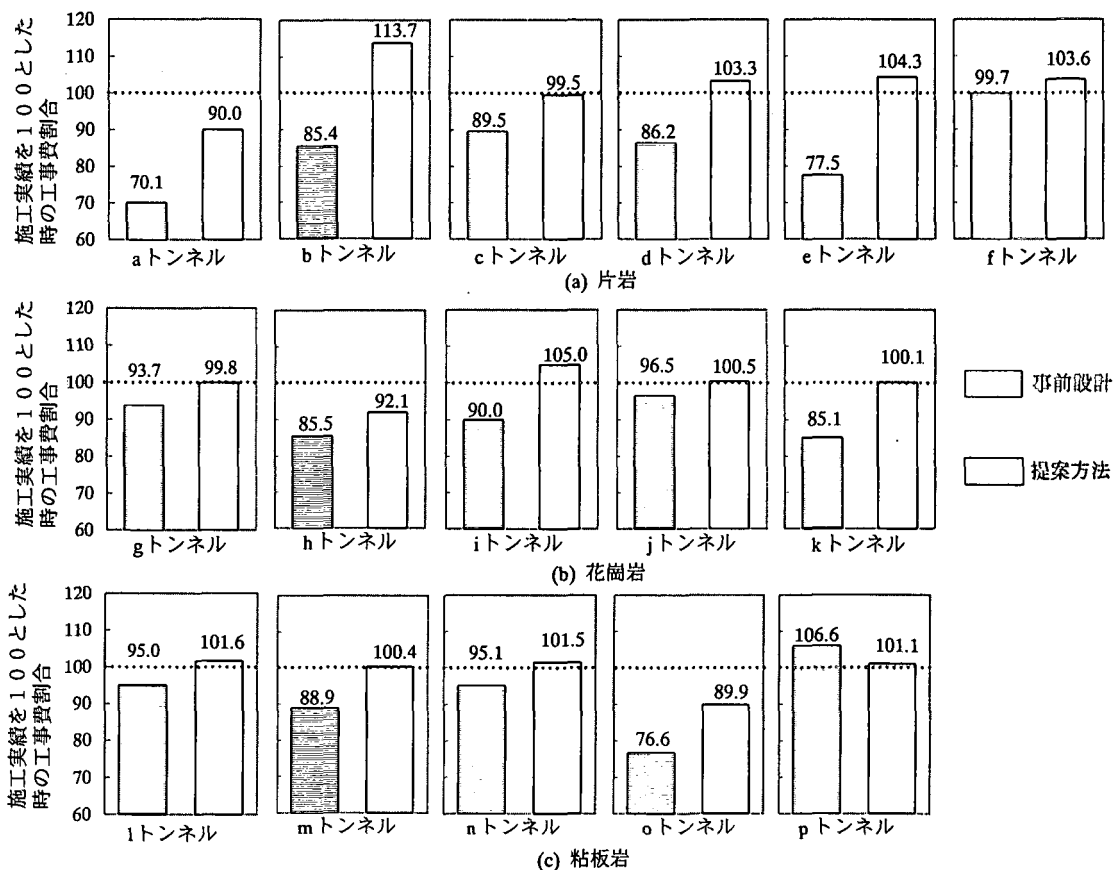


図-6 概算工事費の比較

3. 土被り厚を考慮した工事費積算手法

3.1 概算工事費の算出

図-5で示した土被り区分毎の施工支保延長割合を発生確率と考え、トンネル概算工事費の算出を試みた。表-2に土被り区分ごと各支保パターンの採用割合を示す。

各支保パターンの延長については、片岩を主体としたaトンネルにおけるDIIIパターンの延長の求め方の例を示す。その結果を表-3に示す。表-2に示した各支保パターンの割合にトンネルの各土被り区分の延長を掛けそれを合計したものがトンネルにおけるDIIIパターンの延長21.4となる。同様の計算を他の支保パターンでも計算した。

計算によって求めた各支保パターンの延長に支保パターンごとの1mあたりの仮定した工事費を掛けあわせた合計が概算工事費となる。計算例では、2,675(百万円)とした(表-4参照)。

なお、各支保パターンの工事費は、ズリ出し距離、施工時期、その他の条件により、トンネルごとに異なるため本研究では、DIIIパターンを200万円とし、以下DIIパターンを180万円と20万円ごとにAパターンの80万円と仮定した。

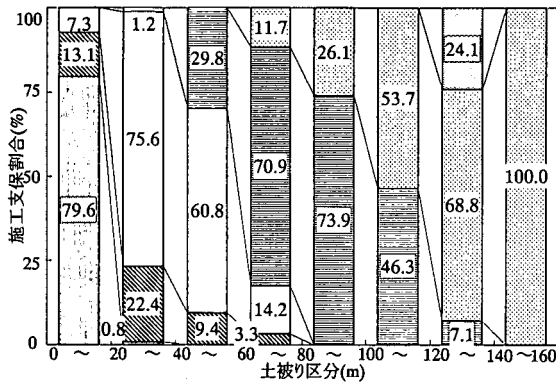


図-7 施工時の支保パターンの延長割合
(hトンネルを除く)

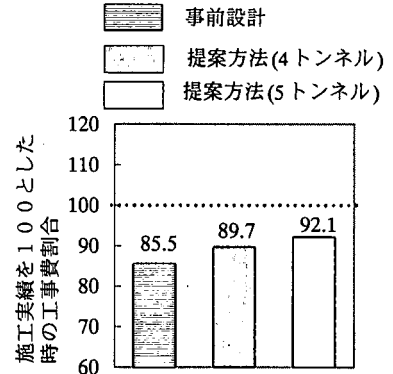


図-8 積算の結果
(hトンネル)

3.2 工事費算出精度

(1) 各岩種における精度

3.1で提案した概算工事費の算出方法の妥当性とばらつきの範囲を明確にするため、事前設計と提案方法の積算実績の比較を行う。事前設計実績および施工実績の費用は、複雑に計算されたものであり、単純に比較できないため、ここでは、提案方法と同様に各支保パターンの1mあたりの施工費をAパターン80万円～DIIIパターンの200万円と仮定した。この金額を事前設計・施工それぞれの支保パターンの延長に乘じることによって、事前設計・施工の工事費とした。事前設計と提案手法の工事費を実施工100に対する工事費の割合として図-6に示す。

岩種別にばらつきの程度についてまとめる。図-6(a)に示す片岩についてみると事前設計では、すべてのケースで施工工事費を下回っている。ばらつきの程度としては、-0.3～-30%である。これは、事前設計で採用された支保パターンが施工時にはすべて重い支保パターンとして変更されたことを意味しており、工事費が最大で事前設計時の1.4倍に増加していることになる。一方、提案手法では、そのばらつきの程度は-10～14%である。図-6(b)、図-6(c)に示す花崗岩、粘板岩においても同様な傾向が認められる。提案手法のばらつきの程度は、花崗岩で-8～5%、粘板岩で-10～20%である。いずれの岩種においても提案手法を用いた場合の精度が向上する。したがって、提案手法は概算工事費の算出やトンネル全体の工事費の目安をつかむために有効であると考えられる。

$$\text{事前設計の割合(\%)} = \frac{\text{事前設計の工事費}}{\text{施工実績の工事費}} \times 100 \quad (2)$$

$$\text{提案方法の割合(\%)} = \frac{\text{提案方法の工事費}}{\text{施工実績の工事費}} \times 100 \quad (3)$$

ここで

事前設計の工事費：当初設計段階での工事費(仮定工事費で再計算したもの)

施工実績：実際にかかった工事費(設計変更後)(仮定工事費で再計算したもの)

提案方法：本文中で提案されている機略工事費

(2) 本手法の適用性の確認

本手法が実際に適用可能なものを花崗岩においてばらつきが大きいhトンネルを除いて検討した。花崗岩4トンネルにおける施工支保パターンの採用割合を図-7に示す。

図-7を図-5(b)と比較すると土盛り厚60m以上でCIIパターンの採用が減っており80m以上で用いられていない。CIIパターンの採用割合が減少する代わりにB、CIパターンの採用割合が増加している傾向が認められる。

次に設計実績、4トンネルによる結果と5トンネルによる結果を比較した。hトンネルの積算実績を図-9に示す。この図より、施工実績と比較すると設計実績では-15%程度の差異が生じているのに対し、本手法の適用による4トンネルの場合では-10%程度、5トンネルの場合では、-8%程度の差に留まっている。また、4トンネルの場合と5トンネルの場合でも2%程度の差が生じた程度であり、全トンネルを含めて検討した結果と大差ないことがわかる。したがって、提案手法は妥当であり、同地域、同岩種のトンネルにおいて適用可能であるといえる。

4. まとめ

本研究は、トンネル計画段階または事前設計段階におけるトンネルの概算工事費の把握を目的としたものである。対象としたトンネルは、中国地方においてNATMで施工された山岳トンネルであり、比較的まとまった地山状況であると考えられる。片岩、花崗岩、粘板岩の3岩種に対して土被り厚と施工支保パターンとの関係を整理・分析した。これらの結果に基づき事前設計手法として工事費積算の考え方の提案を行った。本手法の適用性を施工支保パターンの延長割合から工事費を算定し事前設計の工事費と比較した。その結果、本手法によるものが設計実績より施工実績との差が小さくなることから有効であると考えられた。

本研究で提案した手法の活用法を図-9に示す。本手法を活用することにより、路線計画段階では概算工事費の精度向上、事前調査結果の妥当性の評価、事前設計における工事費の妥当性の評価、施工支保変更の妥当性の評価が可能と考えられる。

本手法は、NATM施工事例に基づき土被り厚と採用された支保パターンとの関係から提案したものである。近年、社会資本整備の中で最近になってからも数多くのトンネルが掘削された。これらのトンネル施工データの整理により本手法の有効活用の可能な岩種、有効と考えられる地域限定等に関して有用な成果が得られるものとする。

参考文献

- 1) 土木学会：トンネル標準示方書（山岳編）・同解説，pp. 9-11，1977.
- 2) 土木学会：トンネル標準示方書〔山岳工法編〕・同解説，p. 18，1996.
- 3) 中川浩二，保岡哲治，北村晴夫，三木茂，藤本睦，木村恒雄：トンネル事前設計における地質調査の問題点とその評価に関する研究，土木学会論文集，No. 658/VI-48，pp. 33-48，2000. 9.

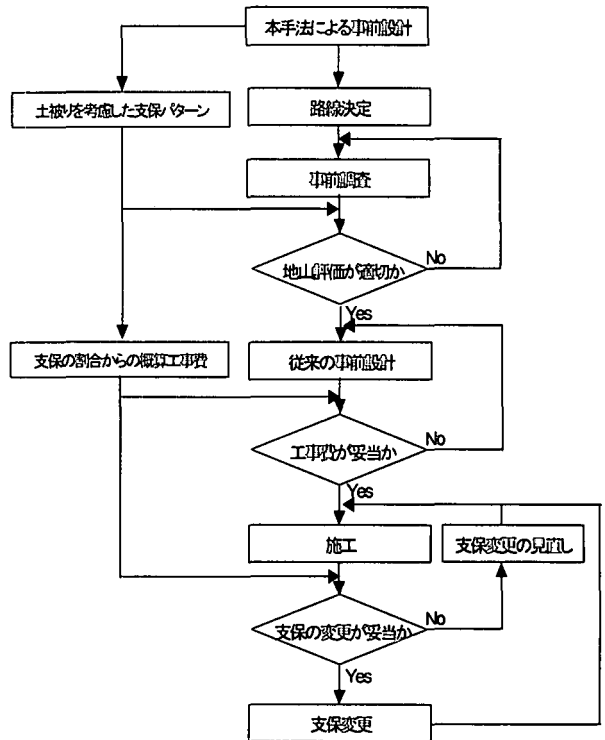


図-9 提案手法の活用法