

共 同 研 究 報 告 書

TBMトンネル掘削時の地山特性と機械データ
および作用荷重の関連性に関する共同研究報告書

平成16年 3 月

独立行政法人 土木研究所
基礎道路技術研究グループ
日本道路公団試験研究所
道路研究部トンネル研究室

Copyright © (2004) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.W.R.I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

TBMトンネル掘削時の地山特性と機械データ および作用荷重の関連性に関する共同研究報告書

独立行政法人 土木研究所 基礎道路技術研究グループ

上席研究員（トンネル） 真 下 英 人

主任研究員（トンネル） 砂 金 伸 治

専門研究員（トンネル） 木 谷 努

日本道路公団 試験研究所・道路研究部

トンネル研究室 室 長 城 間 博 通

関 茂 和

要 旨

本研究では、今後のTBMトンネルの合理的設計・施工に資するため、近年施工されたTBMトンネルを横断的に分析した。そして、TBMトンネルの支保、補助工法選定手法確立のため、施工時に得られた機械データと採用支保工および補助工法との関係について検討した。

また、現在のTBMトンネルの支保工は、過去の施工実績により設定されており、定まったものがなかった。このため本研究では、今後のTBM支保工設計手法の確立を目的として、TBM支保工に作用している荷重を計測データより算定し検討した。

その結果、TBM機械データの特性や支保パターンとの関連性、さらには周辺岩種やマシンタイプ、採用補助工法との相関を明らかにした。また、TBM支保工に作用する荷重の概略値を明らかにし、今後の設計施工に資する基礎データを得た。

キーワード：TBM、機械データ、支保工、荷重、岩種、計測データ

目次

1. はじめに	1
1.1 研究の背景と目的	1
1.2 研究の概要	2
2. 対象トンネルの概要	3
2.1 対象トンネルの全体概要	3
2.1.1 Aトンネル	3
2.1.2 B, Cトンネル	3
2.1.3 Dトンネル	4
2.1.4 E, Fトンネル	4
2.1.5 G, Hトンネル	5
2.1.6 Iトンネル	6
2.1.7 J, Kトンネル	6
2.1.8 Lトンネル	6
2.1.9 Mトンネル	6
2.1.10 Nトンネル	7
2.1.11 Oトンネル	7
2.2 支保パターン	8
2.2.1 各トンネルの支保パターン	8
2.2.2 本研究で整理する共通支保パターン	18
2.3 TBMマシン本体の特徴	19
3. 機械データ分析	28
3.1 機械データの種類について	28
3.1.1 1次機械データ	28
3.1.2 2次機械データ	30
3.2 機械データの分析結果	31
3.2.1 各トンネルの機械データ	31
3.2.2 各岩種における機械データと支保パターンの関係	52
3.2.3 機械データと補助工法採用実績との関係	57
3.3 機械データの分析結果のまとめ	60
4. 支保に作用する荷重の解析	61
4.1 対象断面	61
4.2 計測データの整理	64
4.3 解析手法	91
4.3.1 荷重の算出方法	91

4.3.2 骨組み構造解析のモデル.....	91
4.4 解析結果および考察.....	95
5. おわりに	98
参考文献	100

1. はじめに

1.1 研究の背景と目的

現在、社会的要請が高い“トンネル建設費の縮減”を実現するには、トンネル施工を急速化することを欠くことが出来ない。このような背景から水路トンネル等の本坑、大断面道路トンネルの先進導坑、避難坑などに対してTBMによる施工が増えつつある。しかし、わが国の地質は多岐にわたることから、TBMの実績は比較的小断面に限られているのも事実である。今後、TBMの適用範囲を広げ、標準的な工法として普及させるには、様々な課題が存在し、その解決が望まれている。

トンネル施工の合理化に対しては、地山の緩みを極力抑制し、支保の軽減を図るとともに、地山条件に合致した適切な支保工の選定技術を確立する必要がある。これに対してTBMトンネルでは、一般には、従来の山岳工法と同様に、地山等級に応じて支保パターンをあらかじめ設定し、施工時の地山状況に応じて修正するという手法が行われている。しかし、現在、この支保パターンは十分確立されたものとはなっておらず、現場ごとに過去の施工実績等により設定されているにすぎない。さらに、施工時に得られた情報をどのように支保パターンへ反映するか、また実際施工された支保工は結果としてどのような荷重が作用しどのような状態にあったか、さらなる増強、軽減の必要があったのか等も決して明確ではない。したがって、地山状態に応じた支保構造の設計手法の確立のため、施工時に得られた情報と支保工との関係、施工時に設置された支保工に作用した荷重に対する情報の蓄積が望まれている。

また、TBMトンネルにおいては、断層、破碎帯、高地下水、膨張性などの不良地山において、掘進停止等のトラブルの徴候が見られる場合が多い。そのような時、掘進停止等のトラブル回避の手段として何らかの補助工法を用いるが一般的である。もし、補助工法採用が遅れたり不十分であったりしてトラブルを回避できず掘進不可能となれば、TBMの最大の長所である高速施工が実現できず、工費増大につながることも考えられる。したがって、トラブルの原因となり得るような不良地山部の適切な把握や補助工法の適切な採用は、TBM施工において極めて重要である。すなわち、トラブルの可能性があり補助工法が必要な不良地山部を事前に察知し適切に対処できる手法を確立することが重要である。このような状況から、各トンネルの機械データと補助工法採用箇所との相関についてデータの蓄積および分析が必要である。

このようにTBMトンネルを合理的に施工するためには、支保工、補助工法を適切に選定するために地山評価が重要である。ところが、TBMトンネルでは、トンネル掘削で最も危険度が高いトンネル切羽周辺作業をマシン掘削により自動化し安全性を高めている半面、掘削中の地山の変化を直接目視確認することが難しいという欠点もある。このことは、トンネル掘削の際、問題となる支保工、補助工法選定のために極めて重要である“適切な地山評価”に対して大きな障害となる。この欠点を補うため、TBMの各種機械データを分析し施工中の地山評価に役立てる方法が一般的に行われている。しかし、機械データと選定すべき支保工、補助工法との関連性については、その検討は未だ不十分であることが否定できない。このような状況から、今後のTBM施工のため、データの蓄積およびその評価手法の確立が望まれているところである。

これらの背景のもと、本研究では、TBMトンネル掘削時の地山評価手法、地山状態に応じた支保構造の設計手法、不良地山部に対するトラブル事前回避技術などの確立を目的とする。そして、

近年施工された多くの TBM トンネルを横断的に分析した。具体的には、TBM トンネルの施工時に得られた機械データと支保パターンおよび補助工法、各種地山特性の関係について分析するとともに、計測データを基に TBM 支保工に作用する荷重を算定した。その結果、TBM 機械データの特性や支保パターンとの関連性、さらには周辺岩種やマシンタイプ、採用補助工法との相関を明らかにした。また、TBM 支保工に作用する荷重の概略値を明らかにし、今後の TBM トンネルの合理的設計・施工に資する基礎データを得た。

1.2 研究の概要

前節に述べた研究の背景と目的のもの、本研究では、以下の検討を行う。

まず、第 2 章において、本研究の対象となる、近年 TBM にて施工されたトンネルの概要を紹介する。内容としては、2.1 節においては、そのトンネルの延長や用途などとともに、地質概要等のトンネル全体概要について述べる。さらには、2.2 節において、どのような支保工が設置されたか、各トンネルの支保パターンの概要を整理する。そして、2.3 節においては、TBM のマシン本体の特徴などについて述べる。

次に、第 3 章においては、TBM トンネル施工中に得られた機械データの分析を行う。まず、3.1 節においては、本研究で整理分析する機械データについて、その内容と物理的意味、さらに 2 次的な機械データの計算方法について述べる。次に 3.2 節においては、機械データの分析を行った結果について紹介する。

そして、第 4 章においては、施工時に実施された支保工について、それに対する計測結果から荷重を算定する荷重解析を行う。まず、4.1 節においては、荷重解析を行う断面について、整理する。次に 4.2 節においては、支保工に対して行った計測の結果について整理する。そして、4.3 節においては、本研究で行う荷重解析の手法について述べる。そして、4.4 節においては、荷重解析結果として、算定された鉛直土圧や側圧係数について分析する。

最後に 5 章においては、2 章から 4 章において行われた検討内容をまとめるとともに、今後の課題について述べる。

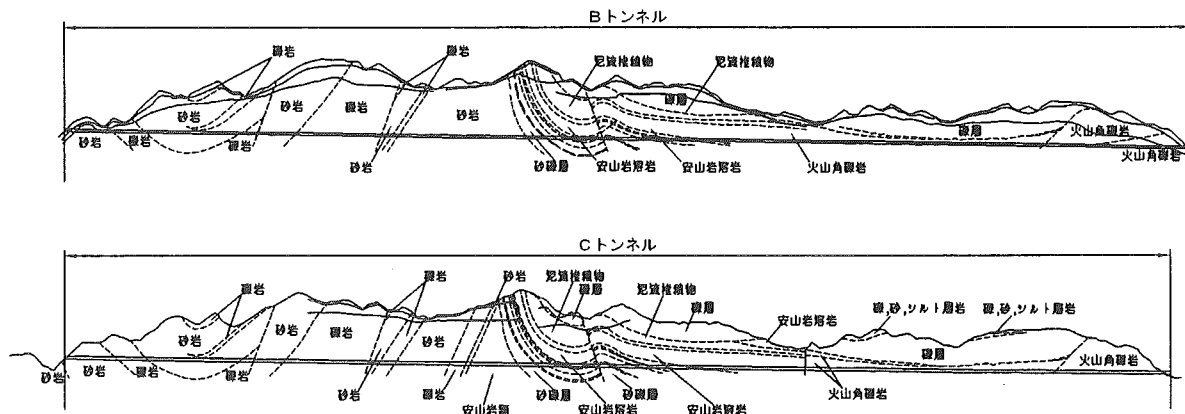


図 2.1.2 B, Cトンネルの概略地質縦断面図

2.1.3 Dトンネル

(1) トンネル概要

Dトンネルの延長は上り線が約 1.4km, 下り線が約 1.6kmのトンネルである。北西から南東方向に伸びる標高 200 から 500mの山地を、ほぼ直角に通過する。尾根の両側には侵食の進んだ谷や沢がいくつも分布している。特に西坑口の下り線北側は、尾根の裾に沿って激しい浸食によって発達した谷があり、上り線は深い沢に沿って計画されており、どちらも土被りが小さくなっている。また、東坑口から 400mの付近では上下線にまたがって大きな沢が横断し、土被りが小さくなっている。

本研究ではφ5.0mの先進導坑 TBM トンネルを対象とする。本 TBM トンネルの特徴は、約 60 mの間隔をおいて施工する上下線 TBM を曲率約 30mにて U ターンするものであり、西側から下り線を掘削し、東側に至り U ターン、その後、東側から上り線を掘削し、西側に至る。TBM 先進導坑の延長は約 2740mである。本研究ではそのうち、上り線部分の機械データを用いる。

(2) 地質概要

新第三紀中新世から鮮新世にかけて堆積した堆積岩類で構成され、砂岩、砂岩と礫岩が主な岩盤である。大きく見ると、日本列島を地質的に 2 分するフォッサマグナと呼ばれる大きな構造帯（断層）の中になり、強い力を受けたため、褶曲や断層が発達している。

2.1.4 E, Fトンネル

(1) トンネル概要

E, Fトンネルは、延長 1.1km のトンネルである。導坑先進掘削工法が採用され、導坑にシールド型 TBM φ5.0m が用いられた。TBM は、下り線西側坑口から掘削を開始し、東坑口手前で U ターンし、上り線の掘削に移行し西側坑口に達した。本研究では、上り線を E トンネル、下り線を F トンネルとする。本トンネルでは、施工段階での地山調査により支保の設計変更が柔軟になされ支保パターンも多数に分けられた。

(2) 地質概要

本トンネルの地質は、新第三紀中新世後期から鮮新世にかけて堆積した堆積岩類で構成され、砂岩と泥岩が主な地質である。西側の近くには大断層構造線が走っており、大小の断層が多く分布している。

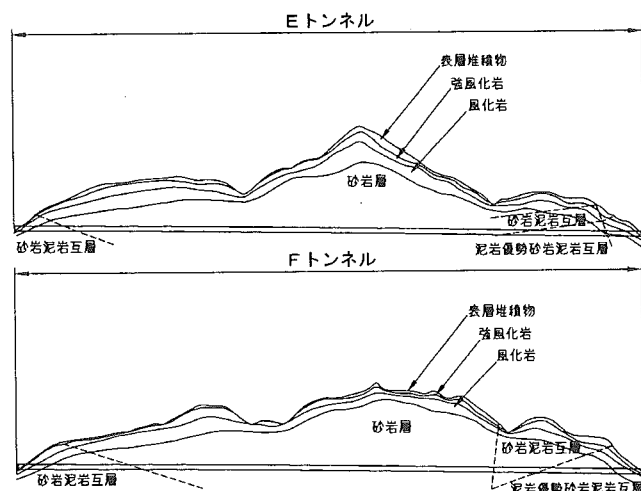


図 2.1.3 E, Fトンネルの概略地質縦断図

2.1.5 G, Hトンネル

(1) トンネル概要

G, Hトンネルは、延長上り線約 3.2 km, 下り線約 3.3kmのトンネルである。発進到達部は NATM で施工されており、 $\phi 5.0\text{m}$ の TBM 先進導坑の延長は約 3.1kmである。本研究では、上り線（東行き）を G トンネル、下り線（西行き）を H トンネルとする。

(2) 地質概要

トンネル掘削断面内には、チャート、粘板岩、輝緑凝灰岩を主体とし、石灰岩、変成岩である千板岩、変輝緑岩、変斑れい岩等が分布している。構造線に囲まれたゾーンに位置しているため、潜在クラックを含めて割れ目が非常に多く発達し、断層破碎帯以外の劣化帯も数多く存在している。

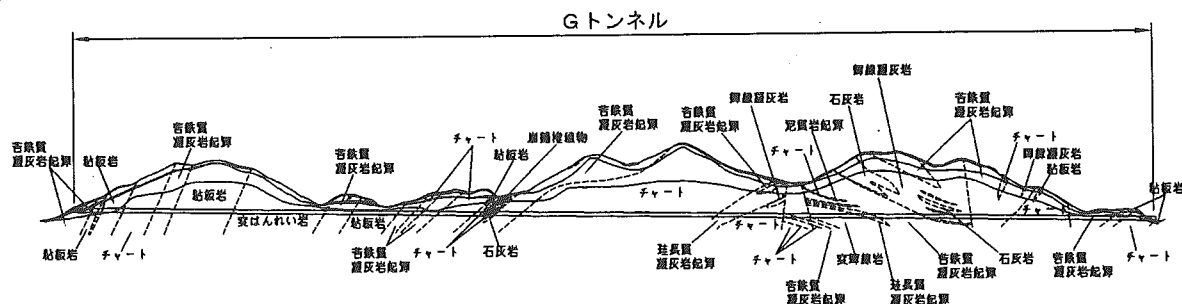


図 2.1.4 G トンネルの概略地質縦断図

2.1.6 I トンネル

(1) トンネル概要

I トンネルは、延長約 4km のトンネルである。本研究では、このトンネルの下り線に用いられた先進導坑 TBM トンネルを対象とする。TBM トンネルは、延長 3.6km、 $\phi 5.0\text{m}$ である。

(2) 地質概要

本トンネルの片側は、中世代白亜紀に貫入した花崗岩からなり、一部は中生代ジェラ紀のホルンフェルスとなっている。ホルンフェルスは、花崗岩が貫入したときの熱で変成したものであり、割れ目が多く生成されている。一方、もう逆側は第三紀中新世の礫岩、砂岩、凝灰岩からなる。

2.1.7 J, K トンネル

(1) トンネル概要

J, K トンネルは、延長 3.8km のトンネルである。上り線では西側坑口より導坑先進拡幅工法が用いられ、オープン型 $\phi 5.0\text{m}$ TBM による先進導坑として 2.6km の区間が掘削された。本研究では、上り線を J トンネル、下り線を K トンネルとする。

(2) 地質概要

地質の大部分は、白亜紀後期の粗粒黒雲母花崗岩で占められている。

2.1.8 L トンネル

(1) トンネル概要

L トンネルは、M トンネルとほぼ同位置にある延長約 6km のトンネルである。オープン型 $\phi 4.5\text{m}$ TBM による避難坑が本坑に並行して掘削された。支保パターンでは地山が軟弱であったせいか鋼アーチ支保工の設置が多く見られた。

(2) 地質概要

地質は、地質は、第三紀の流紋岩類が主体で、部分的にドレライト、石英斑岩、ひん岩などの岩脈が貫入している。また、帯水や小断層も確認された。

2.1.9 M トンネル

(1) トンネル概要

M トンネルは、延長 3.2km のトンネルである。本研究の対象としているのは、本坑に隣接して掘削された避難坑で、オープン型 $\phi 4.5\text{m}$ TBM が導入されている。支保パターンは施工段階で 3 パターンが使用されている。予想より地山が悪く、多くの区間で D パターンが採用されている。

(2) 地質概要

地質は、古第三紀始新世の流紋岩質凝灰岩、新第三紀中新世の凝灰岩、安山岩、凝灰角礫岩が不整合の関係を呈しながら緩い傾斜を持っており粗粒砂岩が岩脈にしばしば貫入している。比較的良好な岩盤が多く、この箇所では最大月進 500m 以上を記録した。

2.1.10 N トンネル

(1) トンネル概要

N トンネルは、延長約 4.3km のトンネルである。下り線側に避難坑を設置し、避難坑のうち約 3 km は、 $\phi 4.5\text{m}$ のオープン型 TBM にて施工されている。

(2) 地質概要

地質は、主に凝灰岩、流紋岩とそれと同時期の貫入岩である花崗斑岩からなり、谷部には厚めの被覆層が分布している。

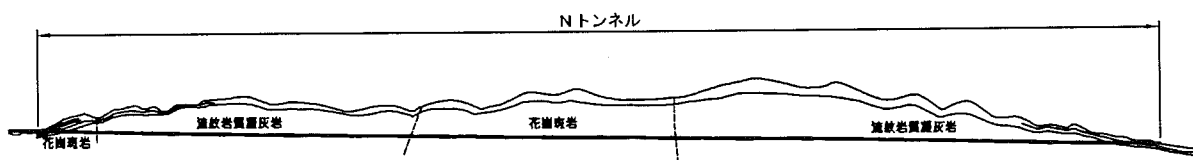


図 2.1.5 N トンネルの概略地質縦断図

2.1.11 O トンネル

(1) トンネル概要

O トンネルは、延長約 10.75km の避難坑を併設した長大トンネルである。本トンネルでは、 $\phi 12.8\text{m}$ の 2 車線大断面 TBM トンネルおよび $\phi 4.5\text{m}$ の避難坑 TBM トンネルがあるが、本研究では避難坑トンネルを対象とする。

(2) 地質概要

本トンネルでは、坑口付近の中世代（ジェラ紀～白亜紀）の花崗岩類、先三畳紀の変成岩類、さらに中世代（白亜紀）の流紋岩、逆側坑口部約 1.5km 区間には、中世代（白亜紀）の花崗岩類、その他小範囲で第三紀の貫入岩類が存在する。

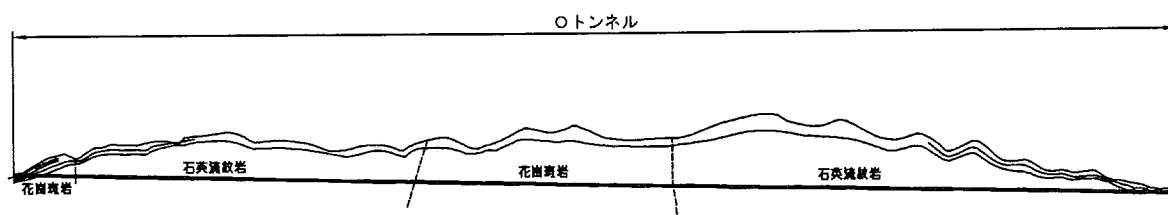


図 2.1.6 O トンネルの概略地質縦断図

2.2 支保パターン

2.2.1 各トンネルの支保パターン

(1) Aトンネルの支保パターン

Aトンネルにおいて設定された支保パターンは、無支保から全周セグメントであり表 2.2.1 に示す通りである。図 2.2.1 に A トンネルの支保パターン図を示す。なお、実施工では、支保パターン BT はほとんど用いられなかった。

表 2.2.1 A トンネルの支保パターン

	BT	C I T	C I I T	D I T	D I T (R)	D I i Ts
支保工	無支保	H 鋼(H-100) +木矢板	H 鋼(H-100) +木矢板	インバート セグメント +H 鋼(H-100) +木矢板	セグメント(3P) +H 鋼(H-100) +ラグ材	全周セグメント
支保間隔	-	1.5m	1.25m	1.0m	1.0m	1.0m

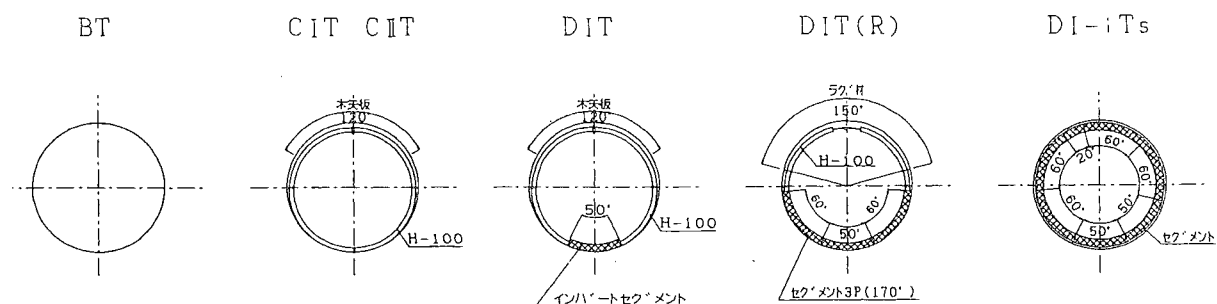


図 2.2.1 A トンネルの支保パターン図

(2) Bトンネル

Bトンネルにおいて設定された支保パターンは、ファイバー入り吹付けモルタルのみから鋼アーチセグメントであり表 2.2.2 に示す通りである。図 2.2.2 に B トンネルの支保パターン図を示す。なお、実施工では、支保パターン CIT はほとんど用いられなかった。

表 2.2.2 B トンネルの支保パターン

	C I T	C I I T	D I	D I -I(I)	D I -I
支保工	ファイバー入り吹付けモルタル (t=20) 180°	H 鋼(H-100) +ファイバー入り吹付けモルタル (t=20) 240°	H 鋼(H-100) +ファイバー入り吹付けモルタル (t=30) 270°	H 鋼(H-100) +ファイバー入り吹付けモルタル (t=30) 270° +矢板(90° 以上)	鋼製セグメント
支保間隔	-	1.5m	1.0m	1.0m	1.0m

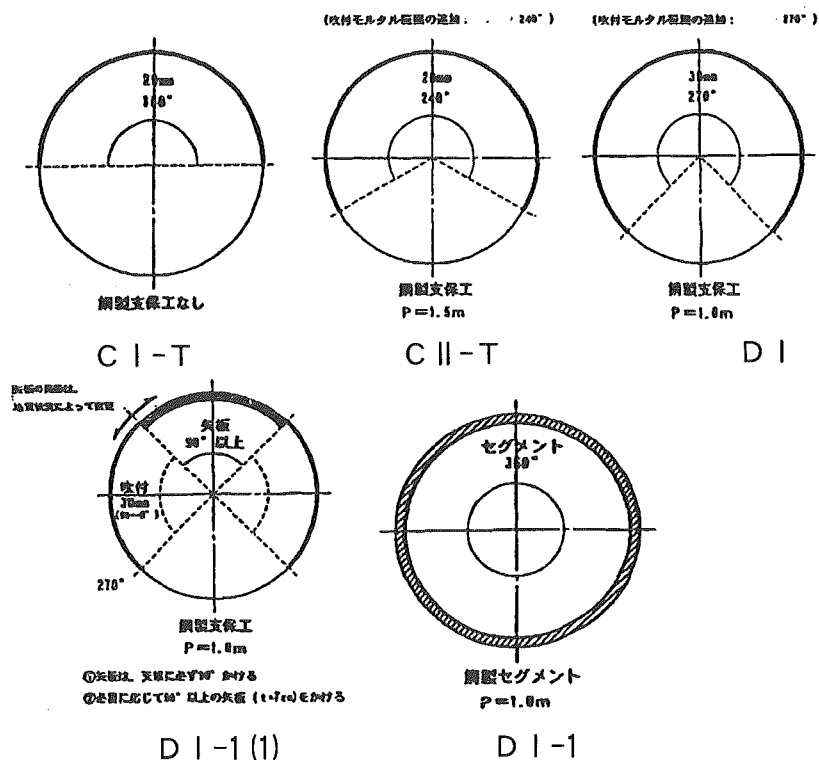


図 2.2.2 Bトンネルの支保パターン図

(3) Cトンネル

Cトンネルにおいて設定された支保パターンは、ファイバー入り吹付けモルタルのみから鋼製セグメントであり、表 2.2.3 に示す通りである。図 2.2.3 にCトンネルの支保パターン図を示す。

表 2.2.3 Cトンネルの支保パターン

	C I-T	C II-T	D I-T	D I-T1(1)	D I-T1
支保工	ファイバー入り吹付けモルタル (t=20) 180°	H鋼(H-100) +ファイバー入り吹付けモルタル (t=20) 180°	H鋼(H-100) +ファイバー入り吹付けモルタル (t=30) 180°	簡易ライナー	鋼製セグメント
支保間隔	-	1.5m	1.0m	1.0m	1.0m

適用地質	地山等級がC I-T~D I-T			崩壊性地山	入山断層帯
断面区分	C I-T	C II-T	D I-T	D I-T1 (1)	D I-T1
支保パターン					
推進方式	スラッシュャック推進			スラッシュャック推進	シートジャック推進

図 2.2.3 Cトンネルの支保パターン図

(4) Dトンネル

Dトンネルにおいて設定された支保パターンは、無支保からH-100+ファイバー入り吹付けモルタル+木矢板であり、表 2.2.4 に示す通りである。図 2.2.4 にCトンネルの支保パターン図を示す。

なお、実施工では支保パターン BT はほとんど用いられなかった。

表 2.2.4 Dトンネルの支保パターン

	B-T	C I-T	C II	D I-1	D I-2	D I-3
支保工	無支保	ファイバ-入り 吹付けモルタル (t=20) 120°	H 鋼(H-100) +ファイバ-入り 吹付けモルタル (t=20) 180°	H 鋼(H-100) +ファイバ-入り 吹付けモルタル (t=30) 270°	H 鋼(H-100) +ファイバ-入り 吹付けモルタル (t=30) 270°	H 鋼(H-100) +ファイバ-入り 吹付けモルタル (t=30) 75° × 2 +木矢板
支保間隔	-	-	1.5m	1.0m	0.5m	0.5m

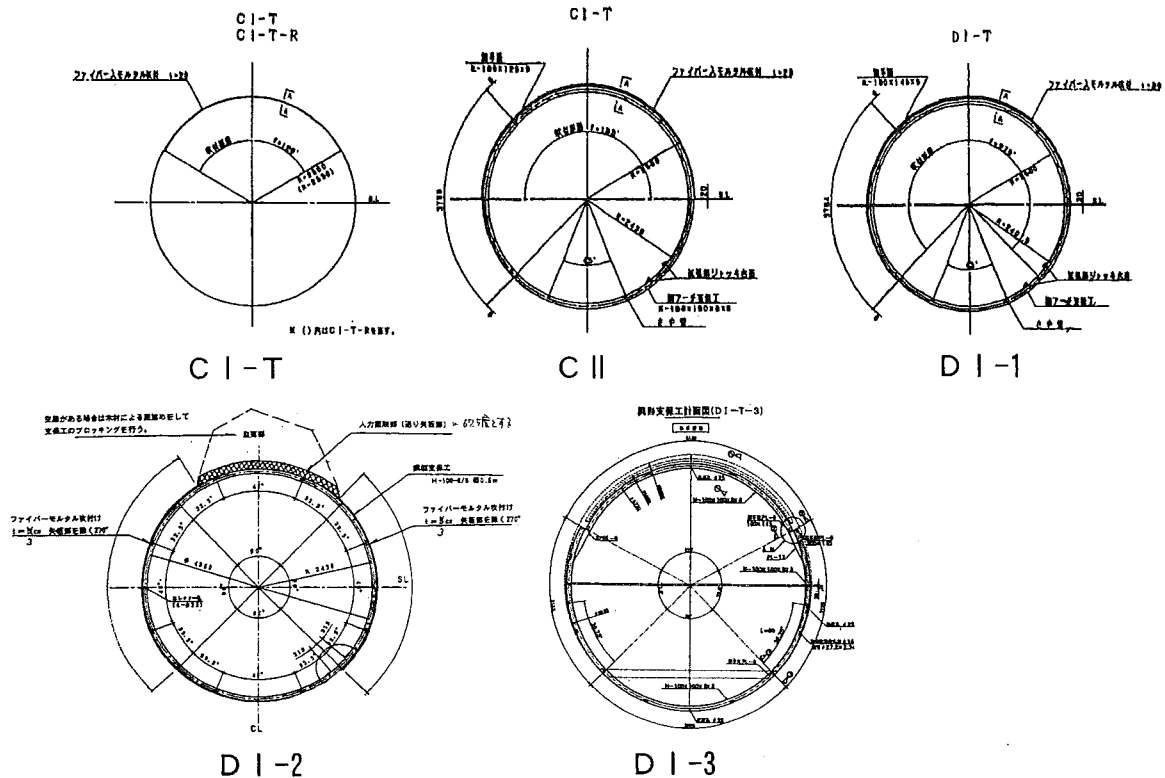


図 2.2.4 Dトンネルの支保パターン図

(5) E, Fトンネル

E, Fトンネルにおいて設定された支保パターンは、ファイバー入り吹付けモルタルのみからH-125+ファイバー入り吹付けモルタルであり、表 2.2.5 に示す通りである。図 2.2.5 にE, Fトンネルの支保パターン図を示す。

表 2.2.5 E, Fトンネルの支保パターン

	C I-T2	C II-T2	D I-T2	D I-T3	D I-TR3
支保工	ファイバ-入り 吹付けモルタル (t=20) 180°	H 鋼(H-100) +ファイバ-入り 吹付けモルタル (t=20) 180°	H 鋼(H-125) +ファイバ-入り 吹付けモルタル (t=30) 180°	H 鋼(H-125) +ファイバ-入り 吹付けモルタル (t=30) 180°	H 鋼(H-125) +ファイバ-入り 吹付けモルタル (t=30)180° + 反力受け
支保間隔	-	1.0m	1.0m	1.0m 以下	1.0m 以下

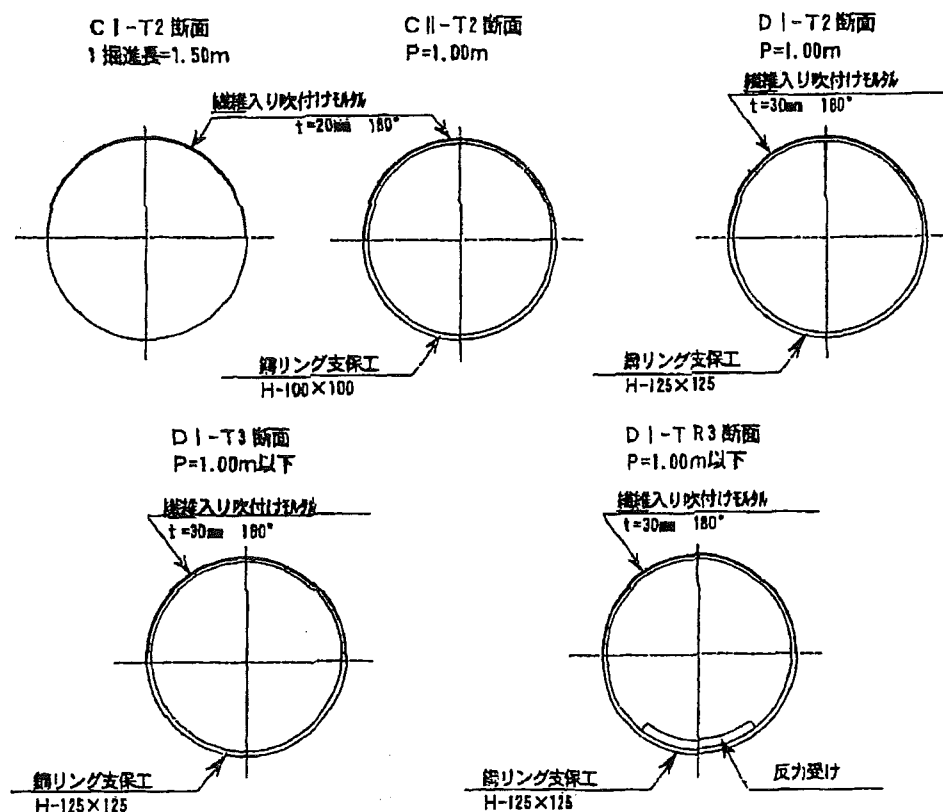


図 2.2.5 E, Fトンネルの支保パターン図

(6) Gトンネル

Gトンネルにおいて設定された支保パターンは、無支保からH-125+ファイバー入り吹付けモルタルであり、表 2.2.6 に示す通りである。図 2.2.6 にGトンネルの支保パターン図を示す。

表 2.2.6 Gトンネルの支保パターン

	B-T	C I-T1	C II-T2	D I-T2	D I-T3	D I-T4	D I-T5
支保工	無支保	ファイバー入り 吹付けモルタル (t=20) 120°	H鋼(H-100) +ファイバー入り 吹付けモルタル (t=20) 120°	H鋼(H-100) +ファイバー入り 吹付けモルタル (t=30) 120°	H鋼(H-100) +ファイバー入り 吹付けモルタル (t=30) 102.4° +鉄矢木	H鋼(H-125) +ファイバー入り 吹付けモルタル (t=30) 95° +鉄矢木	H鋼(H-125) +ファイバー入り 吹付けモルタル (t=30) 120°
支保間 隔	-	1.5m	1.5m	1.0m	1.0m	1.0m	1.0m

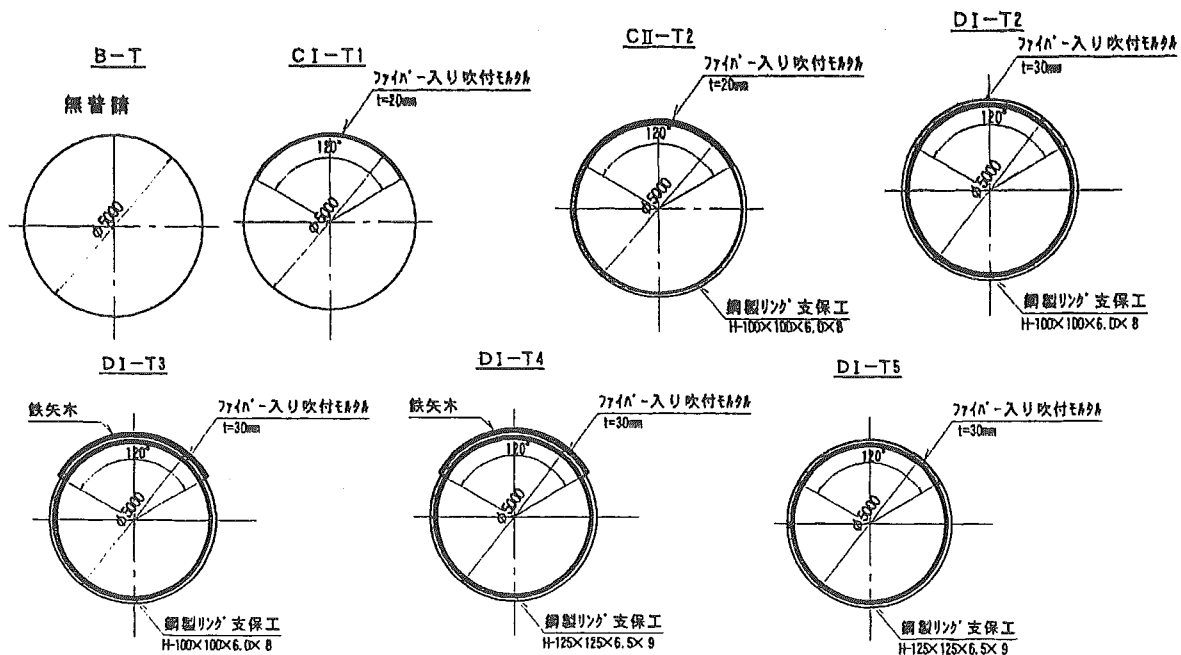


図 2.2.6 Gトンネルの支保パターン図

(7) Hトンネル

Hトンネルにおいて設定された支保パターンは、ファイバー入り吹付けモルタルのみからH-100+ファイバー入り吹付けモルタルであり、表 2.2.7 に示す通りである。図 2.2.7 にHトンネルの支保パターン図を示す。なお、実施工では支保パターンC Iはほとんど用いられなかった。

表 2.2.7 Hトンネルの支保パターン

	C I	C II	D
支保工	ファイバ-入り吹付けモルタル (t=20) 120°	H 鋼(H-100) +ファイバ-入り吹付けモルタル (t=20) 120°	H 鋼(H-100) +ファイバ-入り吹付けモルタル (t=30) 120°
支保間隔	-	1.5m	1.0m

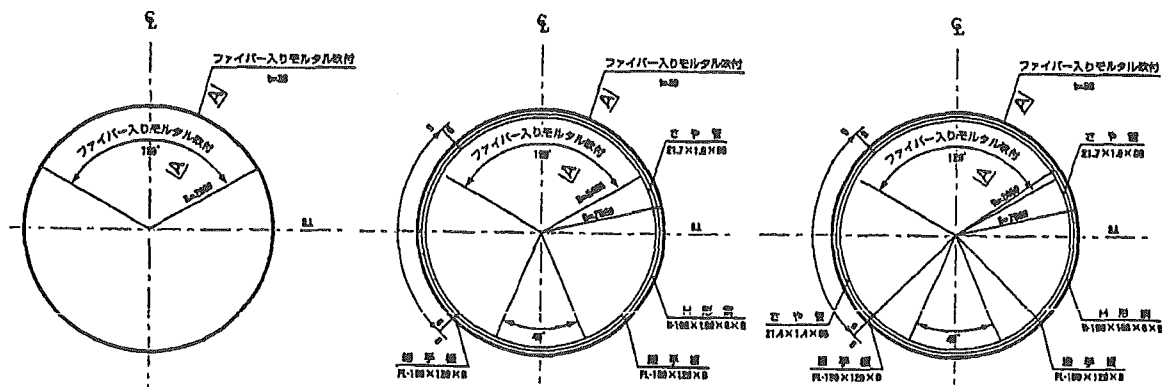


図 2.2.7 Hトンネルの支保パターン図

(8) Iトンネル

Iトンネルにおいて設定された支保パターンは、無支保からH-125+ファイバー入り吹付けモルタルであり、表 2.2.8 に示す通りである。図 2.2.8 にIトンネルの支保パターン図を示す。

表 2.2.8 I トンネルの支保パターン

	B	C I	C II	D
支保工	無支保	ファイバ-入り 吹付けモルタル (t=20) 120°	H 鋼(H-100) +ファイバ-入り 吹付けモルタル (t=20) 180°	H 鋼(H-125) +ファイバ-入り 吹付けモルタル (t=30) 270°
支保間隔		-	1.5m	1.0m

断面 C I-T

断面 C II-T

断面 D I-T

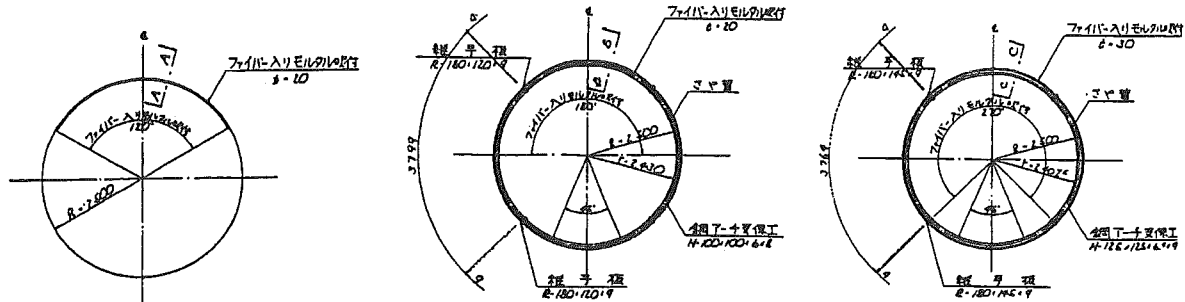


図 2.2.8 I トンネルの支保パターン図

(9) J トンネル

J トンネルにおいて設定された支保パターンは、無支保から鋼製セグメントであり、表 2.2.9 に示す通りである。図 2.2.9 に J トンネルの支保パターン図を示す。

表 2.2.9 J トンネルの支保パターン

	B-T	C I-T	C II-T	D I-T	D I-T2	D I-T3
支保工	無支保	ファイバ-入り 吹付けモルタル (t=20) 120°	H 鋼 (H-100,125) +ファイバ-入り 吹付けモルタル (t=20) 120°	H 鋼 (H-100,125) +ファイバ-入り 吹付けモルタル (t=30) 270°	H 鋼 (H-100,125) +ファイバ-入り 吹付けモルタル (t=30) 270°	鋼製セグメント +エア-モルタル 裏込め
支保間隔	-	-	1.4m	1.0m	0.6m	0.5m

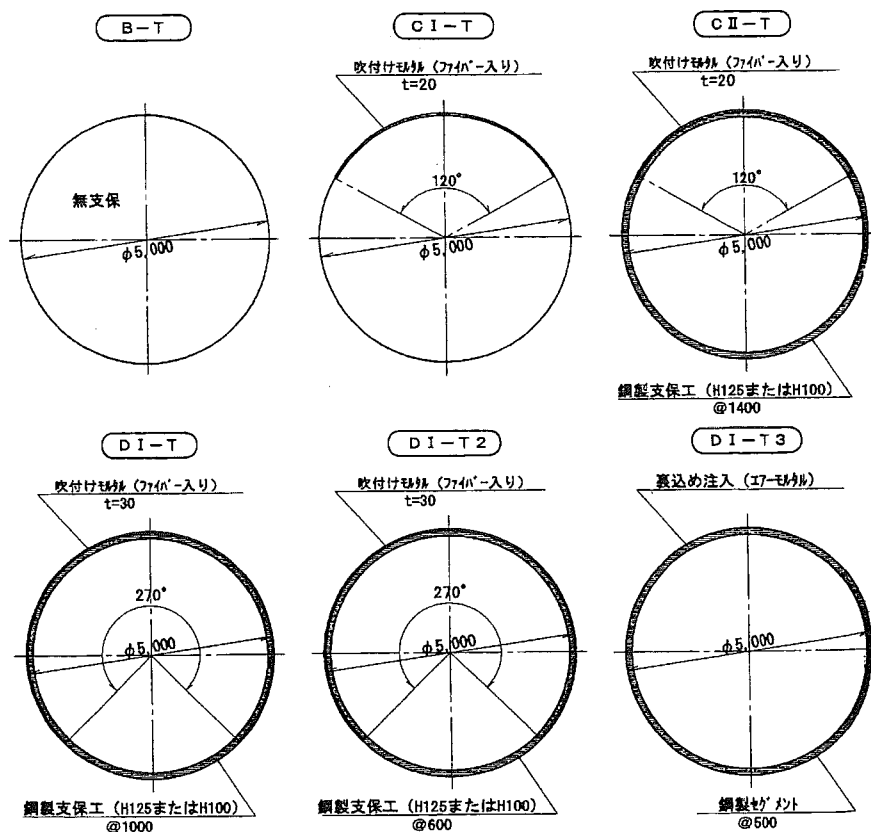


図 2.2.9 J トンネルの支保パターン図

(10) K トンネル

K トンネルにおいて設定された支保パターンは、無支保から鋼製セグメントであり、図 2.2.10 に示す通りである。表 2.2.10 にK トンネルの支保パターン図を示す。

表 2.2.10 K トンネルの支保パターン

	B-T	C I-T	C II-T	C II-Ta	D I-T	D I-Ta	D I-TI
支保工	無支保	ファイバー入り 吹付けモルタル (t=20) 120°	H 鋼 (H-100,125) + ファイバー入り 吹付けモルタル (t=20)180°	H 鋼 (H-100,125) + ファイバー入り 吹付けモルタル (t=20)240°	H 鋼 (H-100,125) + ファイバー入り 吹付けモルタル (t=30)270°	H 鋼 (H-100,125) + ファイバー入り 吹付けモルタル (t=30)270° + 矢板	鋼製セグメント
支保 間隔	-	-	1.5m	1.5m	1.0m	1.0m	0.5m

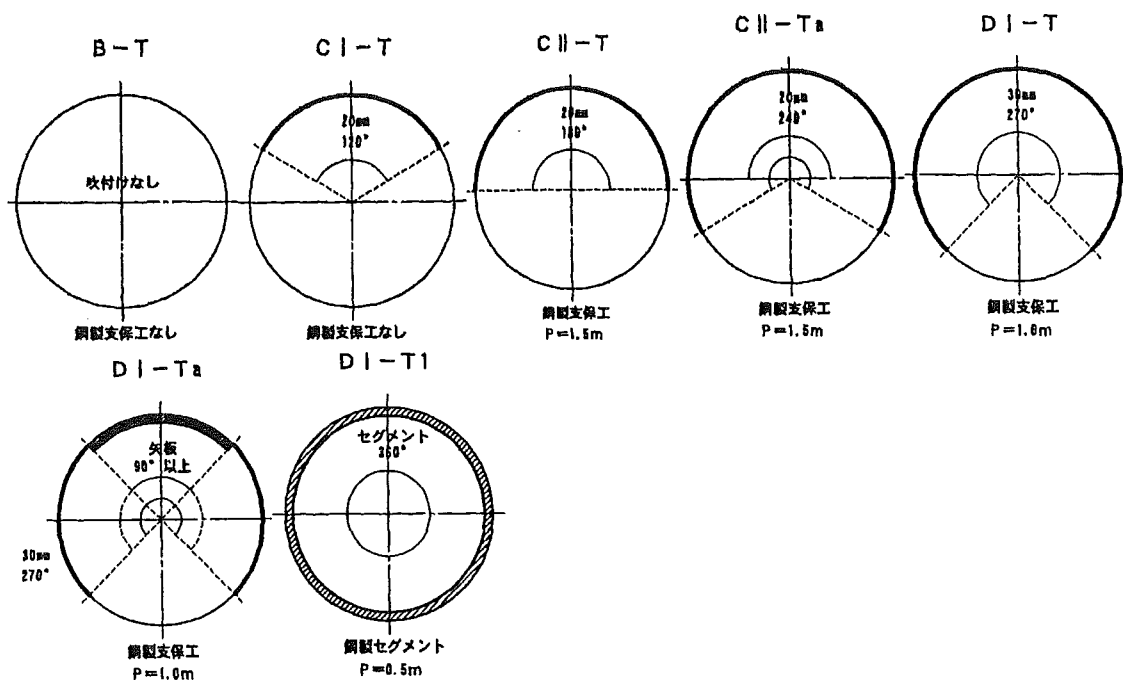


図 2.2.10 Kトンネルの支保パターン図

(11) Lトンネル

Lトンネルにおいて設定された支保パターンは、ファイバー入り吹付けモルタルのみから H-100+ファイバー入り吹付けモルタルであり、表 2.2.11 に示す通りである。図 2.2.11 にLトンネルの支保パターン図を示す。

表 2.2.11 Lトンネルの支保パターン

	C	D	D I
支保工	ファイバー入り 吹付けモルタル (t=20) 260°	H 鋼(H-100) +ファイバー入り 吹付けモルタル (t=20)260°	H 鋼(H-100) +ファイバー入り 吹付けモルタル (t=20)115°
支保間隔	-	1.0m	0.5m

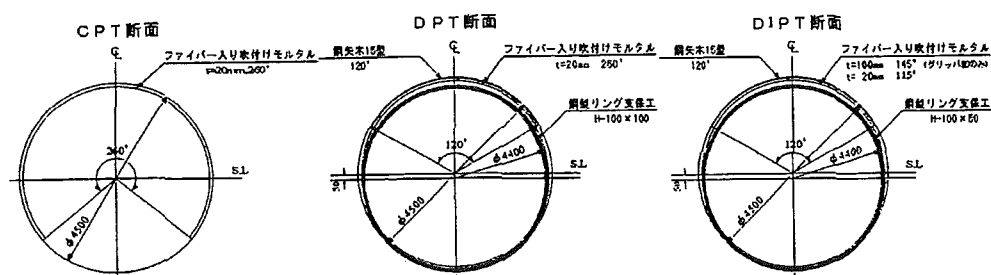


図 2.2.11 Lトンネルの支保パターン図

(12) Mトンネル

Mトンネルにおいて設定された支保パターンは、ファイバー入り吹付けのみから H-100+ファイバー入り吹付けモルタルであり、表 2.2.12 に示す通りである。図 2.2.12 にMトンネルの支保パターン図を示す。

表 2.2.12 Mトンネルの支保パターン

	C I	C II	D
支保工	ファイバ-入り 吹付けモルタル (t=20) 260°	ファイバ-入り 吹付けモルタル (t=20) 260°	H 鋼(H-100) +ファイバ-入り 吹付けモルタル (t=20)260° +鋼矢板
支保間隔	-	-	1.0m

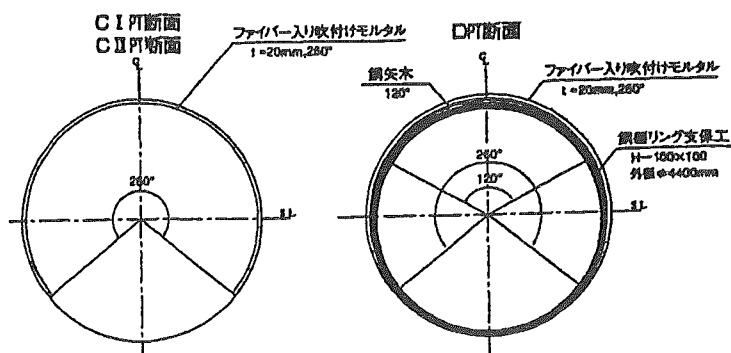


図 2.2.12 Mトンネルの支保パターン図

(13) Nトンネル

Nトンネルにおいて設定された支保パターンは、無支保から鋼製セグメントであり、表 2.2.13 に示す通りである。図 2.2.13 にNトンネルの支保パターン図を示す。

表 2.2.13 Nトンネルの支保パターン

	B	C I	C II	D I	D II	E
支保工	無支保	ファイバ-入り 吹付けモルタル (t=20) 260°	H 鋼(H-100) +ファイバ-入り 吹付けモルタル (t=20) 260°	H 鋼(H-100) +ファイバ-入り 吹付けモルタル (t=30) 260°	H 鋼(H-100) +ファイバ-入り 吹付けモルタル (t=30) 260° +鋼矢板 120°	鋼製セグメント
支保間隔	-	-	1.5m	1.0m	0.5m	0.75m

2.2.2 本研究で整理する共通支保パターン

前節では、各 TBM トンネルで定められた支保パターンについて述べた。これらから分かるように、TBM トンネルにおいては、その支保パターンが、個別のトンネル毎に定められており、決して統一されているとは言えない状況にある。例えば、D I という支保パターンについては、あるトンネルでは鋼製支保工 H-100 程度が用いられているのに対し、またあるトンネルでは鋼製セグメントが用いられている。

本研究では、採用された支保工パターンと TBM 機械データおよび各種地山特性の関係について、多くの TBM トンネルを横断的に分析する。したがって、支保パターンの意味する支保規模が各トンネルにおいて異なり、またその支保パターンのまま整理分析することは、支保特性およびそれに関連する地山特性を見誤る可能性がある。

そこで、本研究では、支保パターン整理・分析の便宜上、各トンネルの支保パターンを下記に示す共通支保パターンに変換して、整理することとする。これは、トンネル毎に定められた支保パターンのうち、様々に異って設定された吹付けコンクリートの打設角度や矢板を無視し、大まかな吹付けコンクリート厚さや鋼アーチ支保工の大きさのみに着目し、分類しなおしたものである。なお、この共通支保パターンは整理の便宜上設定するものであって、全トンネルに共通する支保パターンを提案するものではないので注意を要する。

表 2.2.15 本研究で便宜上設定する共通支保パターン

パターン	
B	無支保 相当
C I	吹付け(2cm) 相当
C II	吹付け(2cm), 鋼アーチ支保工 H-100 使用 相当
D I	吹付け(3cm), 鋼アーチ支保工 H-100 使用 相当
D II	吹付け(3cm), 鋼アーチ支保工 H-125 使用 相当
L1	簡易ライナー 相当
L	鋼製セグメント 相当

2.3 TBMマシン本体の特徴

ここでは、本研究対象のトンネルにおいて用いられた TBM マシン本体の特徴について整理する。

主要な TBM マシン仕様については、対象トンネル全体での平均値や最大値、最小値をオープンタイプについては表 2.3.1 に、シールドタイプについては、表 2.3.2 に示す。なお、今回の対象トンネルにおいては、掘削径が 3.5 から 5m という限られた範囲であり、かつ大部分が掘削径 5m である。したがって、ここで示す機械仕様も径が 3.5m から 5m と限られた範囲のマシンのものであることに注意する必要がある。

また、主要な TBM マシン仕様の数値同士で比をとったものも表 2.3.1、表 2.3.2 に示す。これらは、異なるマシン形式も一律に平均しているため、取り扱いには注意が必要であるが、TBM マシン本体の緒元について大まかなイメージをつかむのには都合がよいと考えられる。これによれば、TBM マシン本体長は掘削径の約 2~3 倍であり、全長は同じく平均約 19 倍程度であることが分かる。また、推進推力は重量の 3~5 倍であり、地山の抵抗等に対して対処できるようになっていることがわかる。

表 2.3.1 平均的な主要 TBM マシン仕様（オープンタイプ）

トンネル名	平均	最大	最小
掘削径：D	4.8	5	4.5
本体長：L (m)	13.7	15.4	12.3
全長：L2(m)	89.6	96.6	82.0
重量：W (t：台車含)	307	355	275
総出力(kW)	1216	1400	1020
トルク(kNm)	1317.9	1927	1035
推進総推力：P (kN)	9155	10000	8200
メイングリッパ接地圧(N/mm ²)	3.15	3.58	2.5
フロントグリッパ接地圧(N/mm ²)	-	-	-
L/D	2.84	3.08	2.64
L2/D	18.62	19.32	17.44
P/W	3.00	3.33	2.63

表 2.3.2 平均的な主要 TBM マシン仕様（シールドタイプ）

トンネル名	平均	最大	最小
掘削径：D	4.67	5	3.5
本体長：L (m)	10.2	11.2	8.9
全長：L2(m)	87.7	116	60.4
重量：W (t：台車含)	381	469	220
総出力(kW)	1248	1618	750
トルク(kNm)	1715.8	2250	1010
推進総推力：P (kN)	16167	20000	8000
メイングリッパ接地圧(N/mm ²)	3.43	5.1	2.4
フロントグリッパ接地圧(N/mm ²)	3.75	5.1	2.5
L/D	2.21	2.63	1.95
L2/D	19.40	28.77	12.08
P/W	4.21	5.13	3.64

さらに、各トンネルでの TBM マシン仕様の詳細は、表 2.3.3 から表 2.3.10 に示す。

表 2.3.3 TBMマシン仕様 (AからDトンネル その1)

トンネル名		Aトンネル	Bトンネル	Cトンネル	Dトンネル
掘削径		3.5	5	5	5
マシン形式		フルシールド	フルシールド	フルシールド	フルシールド
マシン備考		中折れ型 (前胴, 中胴, 後胴)	中折れ型 (前胴, 中胴, 後胴)		中折れ型 (前胴, 中胴, 後胴)
TBM の目的		本坑拡張掘削用	本坑拡張掘削用	本坑拡張掘削用	本坑拡張掘削用
掘削延長(m)		2120	4210	4210	2710
地質		凝灰岩, 流紋岩, 玄武岩	安山岩, 砂礫岩	安山岩, 礫岩, 砂岩, 凝灰角礫岩	砂岩, 礫岩, 泥岩, 砂岩泥岩互層
本体長(m)		9.2	9.75	11.05	11.2
全長(m)		100.7	95	93.5	60.4
重量	本体重量 (t)	170	358	390 (後続台車含む)	380 (後続台車含む)
	後続台車重量 (t)	50	111	-	-
電力	カット用電動機出力(kW)	660	1020	1080	900
	総出力 (kW)	750	1618	1300	1100
カッタヘッド	カッタサイズ (mm)	394	432	432 381	432 381
	リング カッタ装備数	27	35	40	40
	トルク (kNm)	1010	2580 990	3000 1500	2500 1250
	回転数 (rpm)	0~7.6	0.5~10	0~7.6	3.5~7.0
推進装置	総推力 (kN)	8000	19000	20000	16000
	スラストジャッキ (kN×本)	2000×4	2000×12	2500×8	2000×8
	ストローク (m)	1.1	1.5	1.6	1.5
	伸張速度最大 (mm/min)	80	150	100	99

表 2.3.4 TBMマシン仕様 (AからDトンネル その2)

トンネル名		Aトンネル	Bトンネル	Cトンネル	Dトンネル
メイングリッパ	押付け力片側 (kN)	7200	12000	10000	10000
	接地圧 (N/mm ²)	5.1	2.4	3.0	2.98
	寸法 (mm)	1240×1130	3120×1600	2850×1170	3000×1100
	張出し量 (mm)	150	300	300	300
フロントグリッパ	押付け力片側 (kN×個)	900×2 900×2	1000×4 1000×2	1500×2 2000×2	
	接地圧 (N/mm ²)	5.1	2.5	3.7 3.3	
	寸法 (mm)	470	490×820	720×720 850×720	
	張出し量 (mm)	90 70	100 210	150	150
シールドジャッキ (kN×本, m/st)		1000×8, 1.15	1500×4, 1.15 1000×4, 1.15	1500×4, 1.15 1000×4, 1.15	1000×4, 1.0
最小曲線半径(m)		100			30
後続設備	後続設備 (台)	15	10	10	6
	ベルト幅 (mm)	450	600	600	600
	搬送能力 (m ³ /hr)	90	250	250	250
集塵機	形式	湿式	乾式	湿式	乾式
	集塵機能力 (m ³ /min)	150	300	300	300
	台数	1	1	1	1
ずり搬出方法		シャトルカー	連続ベルコン	連続ベルコン	6m ³ 鋼車×4 台
その他			連続ベルコン仕様 ベルト幅 610mm ベルト速度 150m/min 運搬能力 230m ³ /hr	連続ベルコン仕様 ベルト幅 610mm ベルト速度 150m/min 運搬能力 230m ³ /hr	ゲージ及びセンターのカッター径は 394mm

表 2.3.5 TBMマシン仕様 (EからIトンネル その1)

トンネル名		E, Fトンネル	Gトンネル	Hトンネル	Iトンネル
掘削径		5	5	5	5
マシン形式		フルシールド	オープン	オープン	オープン
マシン備考		中折れ型 (前胴, 中胴, 後胴)			
TBMの目的		本坑拡張掘削用	本坑拡張掘削用	本坑拡張掘削用	本坑拡張掘削用
掘削延長(m)		1706	3114	3147	3672
地質		砂岩, 砂岩泥岩互層	チャート, 凝灰岩, 粘板岩, 輝緑岩, 変斑れい岩, 千板岩	チャート, 凝灰岩, 粘板岩, 輝緑岩, 変斑れい岩, 千板岩	砂岩泥岩互層, 花崗岩, ホルンフェルス
本体長(m)		11.2	13.94	13.94	13.2
全長(m)		60.5	96.6	96.6	87.2
重量	本体重量 (t)	300	200	200	213
	後続台車重量 (t)	70	100	100	104
電力	カット用電動機出力(kW)	900	900	900	1020
	総出力 (kW)	1100	1160	1160	1020
カッタヘッド	カッタサイズ (mm)	432 381	432	432	432
	リンクカッタ装備数	40	37	37	35
	トルク (kNm)	2500 1250	1100	1100	1300
	回転数 (rpm)	3.5~7.0	2.0~8.0	2.0~8.0	0.8~10.0
推進装置	総推力 (kN)	16000	10000	10000	10000
	スラストジャッキ (kN×本)	2000×8	2500×4	2500×4	2500×4
	ストローク (m)	1.5	1.6	1.6	1.6
	伸張速度最大 (mm/min)	99	100	100	150

表 2.3.6 TBMマシン仕様 (EからIトンネル その2)

トンネル名		E, Fトンネル	Gトンネル	Hトンネル	Iトンネル
メイ ン グ リ ッ パ	押付け力片側 (kN)	10000	12000	12000	12000
	接地圧 (N/mm ²)	2.98	2.96	2.96	2.5
	寸法 (mm)	3000×1100	3000×1350	3000×1350	3560×1350
	張出し量 (mm)	300	150	150	200
フ ロ ン ト グ リ ッ パ	押付け力片側 (kN×個)	1500×2 2000×2	無し	無し	無し
	接地圧 (N/mm ²)	3.9	無し	無し	無し
	寸法 (mm)		無し	無し	無し
	張出し量 (mm)	150	無し	無し	無し
シールドジャッキ (kN×本, m/st)		1000×4, 1.0	1000×4, 1.15	1000×4, 1.15	2000×4, 1.15
最小曲線半径(m)		30			
後続 設備	後続設備 (台)	6	9	9	5
	ベルト幅 (mm)	600	600	600	600
	搬送能力 (m ³ /hr)	250	250	250	250
集塵 機	形式	湿式	湿式	湿式	乾式
	集塵機能 力 (m ³ /min)	330	300	300	300
	台数	2	1	1	2
ずり搬出方法		6m ³ 鋼車×4 台	連続ベルコン	連続ベルコン	連続ベルコン
その他		ゲージ及びセンターの カッター径は 394mm	連続ベルコン仕様 ベルト幅 610mm ベルト速度 152m/min 運搬能力 250m ³ /hr	連続ベルコン仕様 ベルト幅 610mm ベルト速度 150m/min 運搬能力 230m ³ /hr	連続ベルコン仕様 ベルト幅 610mm ベルト速度 150m/min 運搬能力 250m ³ /hr

表 2.3.7 TBMマシン仕様（J からMトンネル その1）

トンネル名		J トンネル	K トンネル	L トンネル	M トンネル
掘削径		5	5	4.5	4.5
マシン形式		オープン	オープン	オープン	オープン
マシン備考					
TBM の目的		本坑拡張掘削用	本坑拡張掘削用	避難坑全断面掘削	避難坑全断面掘削
掘削延長(m)		2630	2600	5733	2993
地質		花崗岩	花崗岩	流紋岩, 石英斑岩, ひん岩	凝灰岩, 安山岩, 凝灰角礫岩
本体長(m)		15.4	15.4	12.3	12.3
全長(m)		94	94	83.3	83.3
重量	本体重量 (t)	300	300	192	192
	後続台車重量 (t)	55	55	83	83
電力	カット用電動機出力(kW)	1080	1080	900	900
	総出力 (kW)	1400	1400	1240	1240
カッタヘッド	カッタサイズ (mm)	432	432	432	432
	リング カッタ装備数	38	38	32	32
	トルク (kNm)	2570 1285	2570 1285	1150 920	1150 920
	回転数 (rpm)	4.1 8.2	4.1 8.2	3.75 9.5	3.75 9.5
推進装置	総推力 (kN)	9320	9320	8200	8200
	スラストジャッキ (kN×本)	4770×2	4770×2	2050×4	2050×4
	ストローク (m)	1.5	1.5	1.5	1.5
	伸張速度最大 (mm/min)	100	100	120	120

表 2.3.8 TBMマシン仕様 (JからMトンネル その2)

トンネル名		Jトンネル	Kトンネル	Lトンネル	Mトンネル
メイン グリ ッ パ	押付け力片側 (kN)	12200	12200	8300	8300
	接地圧 (N/mm ²)	3.58	3.58	3.2	3.2
	寸法 (mm)	2200×1775	2200×1775	2600×1000	2600×1000
	張出し量 (mm)	250	250	220	220
フ ロ ン ト グ リ ッ パ	押付け力片側 (kN×個)	無し	無し	無し	無し
	接地圧 (N/mm ²)	無し	無し	無し	無し
	寸法 (mm)	無し	無し	無し	無し
	張出し量 (mm)	無し	無し	無し	無し
シールドジャッキ (kN×本, m/st)		1000×4, 1.0	1000×4, 1.0	無し	無し
最小曲線半径(m)		200	200	200	200
後続 設備	後続設備 (台)	9	9	6	6
	ベルト幅 (mm)	600	600	610	610
	搬送能力 (m ³ /hr)	250	250	242	242
集塵 機	形式	湿式	湿式	湿式	湿式
	集塵機能 力 (m ³ /min)	330	330	300	300
	台数	2	2	1	1
ずり搬出方法		連続ベルコン	連続ベルコン	連続ベルコン	連続ベルコン
その他		連続ベルコン仕様 ベルト幅 610mm ベルト速度 160m/min 運搬能力 250m ³ /hr	連続ベルコン仕様 ベルト幅 610mm ベルト速度 160m/min 運搬能力 250m ³ /hr	連続ベルコン仕様 ベルト幅 610mm ベルト速度 168m/min 運搬能力 224m ³ /hr	連続ベルコン仕様 ベルト幅 610mm ベルト速度 168m/min 運搬能力 224m ³ /hr

表 2.3.9 TBMマシン仕様（NからOトンネル その1）

トンネル名		N トンネル	O トンネル
掘削径		4.5	4.5
マシン形式		改良オープン	フルシールド
マシン備考			
TBM の目的		避難坑全断面掘削	避難坑全断面掘削
掘削延長(m)		2781	10359
地質		流紋岩 花崗斑岩, 凝灰岩	花崗斑岩, 流紋岩
本体長(m)		13	8.85
全長(m)		82	116
重量	本体重量 (t)	196	310
	後続台車重量 (t)	83	147
電力	カット用電動機出力(kW)	900	1250
	総出力 (kW)	1110	1618
カッタヘッド	カッタサイズ (mm)	432	432
	リング カッタ装備数	32	32
	トルク (kNm)	1550	2000 1000
	回転数 (rpm)	1.25~10.0	0.5~10
推進装置	総推力 (kN)	8200	18000
	スラストジャッキ (kN×本)	4100×2	1500×12
	ストローク (m)	1.5	1.6
	伸張速度最大 (mm/min)	120	125

表 2.3.10 TBMマシン仕様（NからOトンネル その2）

トンネル名		N トンネル	O トンネル
メイン グリッパ	押付け力片側 (kN)	8300	11000
	接地圧 (N/mm ²)	3.2	4.12
	寸法 (mm)	2600×1000	2223×1200
	張出し量 (mm)	190	150
フロン トグリッパ	押付け力片側 (kN×個)	無し	1000×4
	接地圧 (N/mm ²)	無し	4.0
	寸法 (mm)	無し	500×500
	張出し量 (mm)	無し	80
シールドジャッキ (kN×本, m/st)		1000×4, 1.15 60×4, 1.15	1000×4, 0.9 1500×4, 0.9
最小曲線半径(m)			200
後続 設備	後続設備 (台)	8	12
	ベルト幅 (mm)	600	600
	搬送能力 (m ³ /hr)	322	250
集塵 機	形式	湿式	湿式
	集塵機能力 (m ³ /min)	330	300
	台数	1	1
ずり搬出方法		連続ベルコン	連続ベルコン
その他		連続ベルコン仕様 ベルト幅 600mm ベルト速度 180m/min 運搬能力 400m ³ /hr	連続ベルコン仕様 ベルト幅 610mm ベルト速度 150m/min 運搬能力 230m ³ /hr

3. 機械データ分析

3.1 機械データの種類について

ここでは、本研究での分析の対象となる、TBM 掘進中に得られる様々な機械データについて概説する。なお機械データは、1 次機械データと 2 次機械データに分けられる。1 次機械データは、TBM 掘進中に直接機械より得られるデータである。また、2 次機械データは、1 次機械データから掘削径の影響を除去したりする等、1 次機械データに何らかの処理を行うことで得られるものである。

なお、機械データは、掘削にともない連続的（実際は一般にある一定時間間隔ごと）に収集される。本研究では、その連続的に収集されたデータを各ストローク毎に平均したものを 1 データとする。各トンネルのデータ数は、表 3.1.1 のようになっており、全データ数としては 3 万データを超過している。

表 3.1.1 各トンネルのデータ数

トンネル名	データ数	支保パターン別データ数の内訳：[]内がデータ数
A トンネル	1917	C I T[181],C II T[484], D I T[335], D I T(R)[597],D I iTS[320]
B トンネル	1396	C II [24],D I [628],D I I(1)[647],D I I[97]
C トンネル	2121	C I T[124],C II T[169],D I T[960], D I T(1)[36],D I T1(1)[247],D I T1(2)[2],D I T1[583]
D トンネル	986	C I [370],C I R[17],C II [169],D I [332],D I 2[68],D I 3[30]
E トンネル	599	C I T[13],C I T2[321],C II T[23],C II T2[193],D I T[2],D I T2[36],D I T3[11]
F トンネル	557	C I T2[263], C II T2[263], D I T2[9],D I T4[22]
G トンネル	2509	B[15],C I [385],C II [961],D I [1148]
H トンネル	2322	C II [1826],D I [496]
I トンネル	2866	B[392],C I [800],C II [245],D I [1429]
J トンネル	1741	BT[224],C I T[1153],C II T[77],D I T[254],D I T2[7],D I T3[26]
K トンネル	1636	B[226,C I [879],C II [43],C II a[299],D I [104],D I 1[8],D I 2[2],D I a[75]
L トンネル	5761	C[613],D[4666],D I [482]
M トンネル	2585	C I PT[107],C II PT[979],DPT[1499]
N トンネル	2009	BpT[43],C I pT[322],C II pT[796],D I pT[827],EpT[21]
O トンネル	1099	C I [192],C II [150],D I (Type1)[432],D I (Type3)[103],D I (Type4)[222]
合計	30104	

3.1.1 1 次機械データ

(1) 純掘進速度

スラストジャッキを押して実際に掘削している（1 掘進の）間の、単位時間あたりの掘進長である。単位は、mm/min, cm/min 等である。

(2) スラスト推力

掘削のため、ディスクカッタを切羽に押付け推進させるための推力である。スラストジャッキ圧力にジャッキの断面積と使用ジャッキ本数を乗じたものである。単位は、kN 等である。なお、一般にスラスト推力は、図 3.1.1 のように掘削に必要なカッタヘッド推進反力(F_1)、本体部摩擦抵抗力(F_2)、後続台車などのけん引力(F_3)という要素を含んでいる。

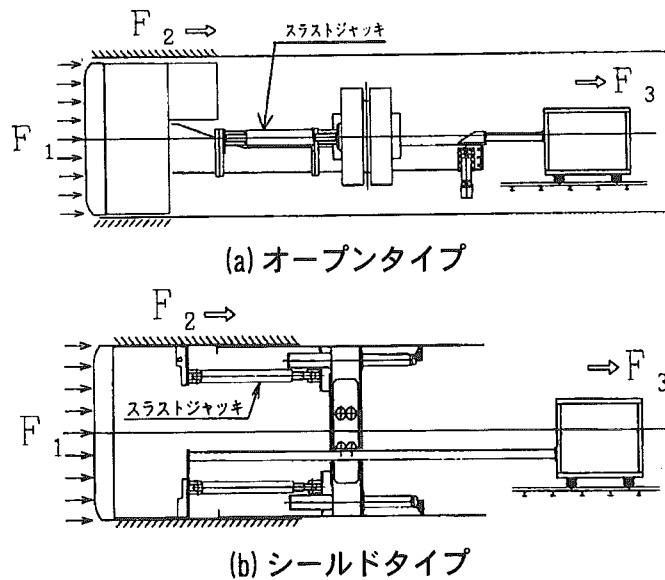


図 3.1.1 スラスト推力¹⁾

(3) カッタトルク

カッタトルクは、カッタヘッドを回転させ、ディスクカッタにより岩盤を破碎掘削するために必要なトルクである。カッタ圧に校正定数を乗じて求められる。単位は、kNm 等である。一般にカッタトルクは、図 3.1.2 のようにディスクカッタによる破碎掘削トルク(T_1)、ずり掻き上げトルク(T_2)、ずりとカッタヘッドの摩擦抵抗および機械抵抗トルク(T_3)という要素を含んでいる。

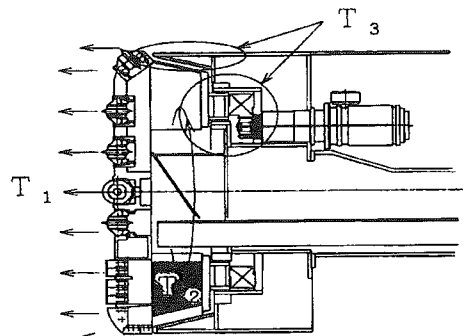


図 3.1.2 カッタトルク¹⁾

(4) カッタ回転数

スラスト推力を押して実際に掘削している（1 掘進の）間にカッタヘッドが回転する回数である。単位は回数である。（ストローク長：1 掘進長）/（純掘進速度）×（カッタ回転速度）としても求められる。

(5) カッタ回転速度

スラストジャッキを押して実際に掘削している（1 掘進の）間の、カッタヘッドが単位時間当たりに回転する回数である。単位は、rpm(round per minute：回転数/分)等である。

(6) カッタ貫入量（切込み量）

スラストジャッキを押して実際に掘削している（1 掘進の）間に、カッタヘッドが 1 回回転することにより、ディスクカッタが岩盤を破碎し掘削する量である。単位は、mm/回数等である。（純掘進速度）/（カッタ回転速度）としても求められる。

3. 1. 2 2 次機械データ

(1) 掘進エネルギー

スラスト推力を掘削断面積で除して、トンネル径の影響を除去したものである。これは、スラスト推力と単位時間当たりの掘進長の積を単位時間当たりの掘削体積で除したものとも言える。すなわち、次式による。

掘削エネルギー=スラスト推力/掘削断面積

(=(スラスト推力×純掘進速度)/(掘削断面積×純掘進速度))

単位は、スラスト推力：kN，掘削断面積：m² の場合は、掘削エネルギー：kN/m² となる。

(2) 回転エネルギー

カッタトルクと単位時間当たりの回転数の積を単位時間当たりの掘削体積で除したものである。すなわち、次式による。

回転エネルギー=(カッタトルク×カッタ回転速度)/(純掘進速度×掘削断面積)

単位は、カッタトルク：kNm，カッタ回転速度：rpm，純掘進速度：m/min(=0.001mm/min) の場合は、回転エネルギー：kN 回転数/m² となる。

(3) 掘削体積比エネルギー

総エネルギー（スラスト系のエネルギーと回転系のエネルギーの和）を単位時間当たりの掘削体積で除したものである。これは、回転エネルギーを補正したものと推進エネルギーの和でもある。すなわち、次式による。

掘削体積比エネルギー

=(スラスト推力×純掘進速度+2π×カッタトルク×カッタ回転速度)

/(掘削断面積×純掘進速度)

(=掘削エネルギー+2π×回転エネルギー)

単位は、掘削エネルギー，回転エネルギーと同様，kN/m² となる。

(4) 仕事量

単位時間当たりにスラスト推力が行った仕事（スラスト推力と純掘進速度の積）を掘削断面積で除したものである。すなわち、次式による。

仕事量=スラスト推力×純掘進速度/掘削断面積

単位は、スラスト推力：kN，純掘進速度：m/min(0.001mm/min)，断面積：m² の場合は、仕事量：kN/(m・min) となる。

本研究では、純掘進速度とスラスト推力との分析を行ったため、本指標の分析は省略した。

(5) 推定岩盤強度

TBM の機械データから切羽の岩盤強度を推定する手法も提案されている²⁾。すなわち、TBM での推力 F_N 、カットトルク T_R は、岩盤強度 σ_c 、切込み量 p によって次式で表されるものとする。

$$F_N = c_1 \times \sigma_c \times p$$

$$T_R = c_2 \times \sigma_c \times p^{1.5}$$

ただし、 c_1 、 c_2 は TBM の緒元(掘削径、カット径、カット間隔など)による定数であり、機械データと室内試験で求めた岩盤強度から決定する方法もある。

単位は、岩盤強度：kN/m²、切込み量：m(0.001mm)、スラスト推力：kN、カットトルク：kNm の場合は、 c_1 ：m、 c_2 ：m^{1.5} となる。

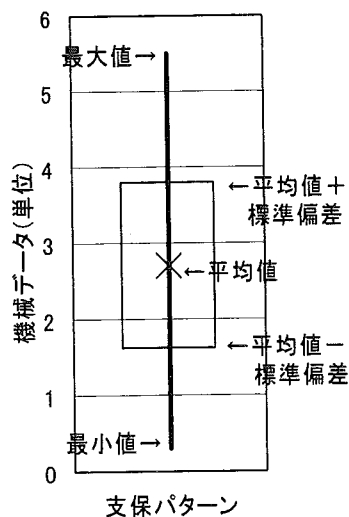
3.2 機械データの分析結果

3.2.1 各トンネルの機械データ

(1) 各トンネルの支保パターンと主要機械データの関係

ここでは、A から O の各トンネルについて、実施された支保パターンと主要な機械データのとの関係を示す。示すデータは、TBM マシンより直接得られる 1 次機械データであり、ここでは、純掘進速度、スラスト推力、カットトルク、カット貫入量とする。これにより、マシンより直接得られるデータが支保パターンとどのように相関するかを分析する。

なお、結果は、箱ひげグラフと呼ばれるグラフで示す。このグラフは、各項目(本研究では支保パターン)ごとにデータ(ここでは機械データ)の平均値、平均+標準偏差、平均-標準偏差、最大値、最小値を示すものである。



※データが下図のような正規分布に仕上がっていると仮定するならば、平均から ± 1 標準偏差(平均-1 標準偏差から平均+1 標準偏差)の範囲に約 68% のデータが含まれることとなる。

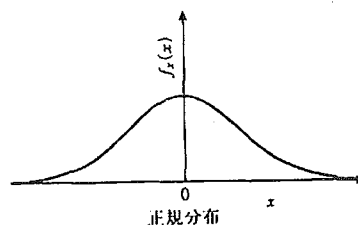


図 3.2.1 箱ひげグラフの例

(a) 純掘進速度

各トンネルの純掘進速度と支保パターンの関係を図 3.2.2 に示す。これによると、おおよそ各トンネルの純掘進速度は、2~9cm/min で分布していることが分かる。しかし、それぞれの最大最小値を考慮すれば 0~12 以上 cm/min と広く分布しており、支保パターン間でのばらつきも大きい。

したがって、純掘進速度の値そのままを支保選定指標として用いるのには問題があると考えられる。

A, Fトンネルでは、安定した純掘進速度が得られており、全支保パターンでAトンネルでは4~7cm/min, Fトンネルでは3~6cm/minと同様の純掘進速度となっている。しかし、逆に言えば支保パターンと純掘進速度との関係は小さいと言える。

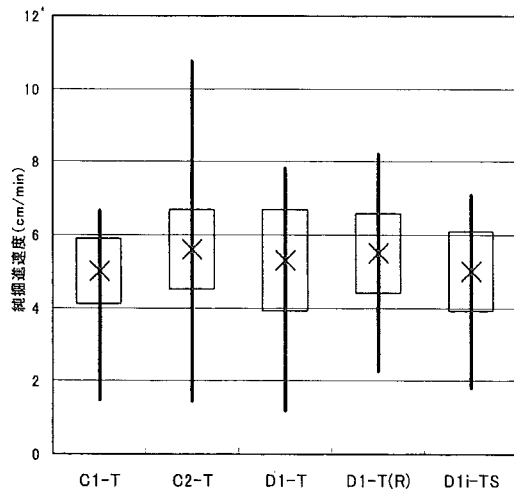
C, D, Eトンネルでは、支保規模が大きくなるにつれて、純掘進速度が一端減少するものの、再度上昇するといった現象が見られている。

Gトンネルでは、支保規模が大きくなると純掘進速度が増加する傾向が見られる。それに対して、B, H, L, M, Oトンネルでは、支保規模が大きくなると純掘進速度が徐々に減少する傾向が見られている。

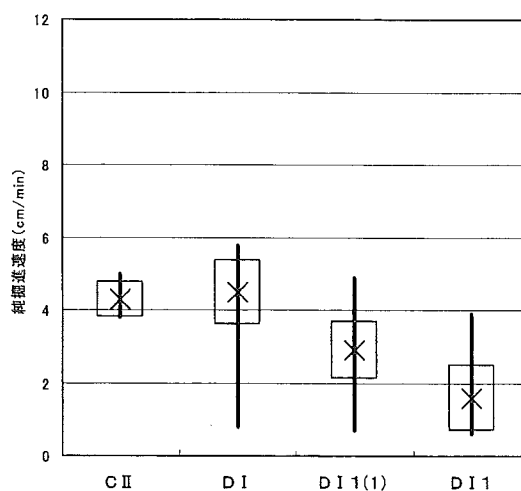
Iトンネルでは、支保パターンBのみが若干小さい純掘進速度であるが、それより大きい支保規模では、純掘進速度はほぼ一定となっている。

J, Kトンネルでは支保規模が大きくなると、純掘進速度が一端増加し、その後減少し、また再度増加するという、波形の形状となっている。

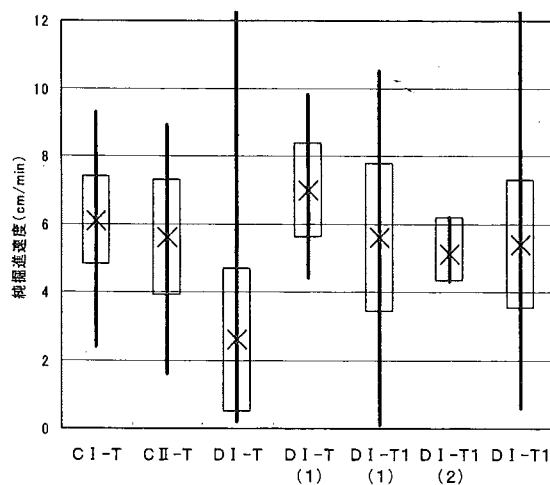
Nトンネルでは、ある中間的な支保規模を頂点とする上に凸な形状となっている。



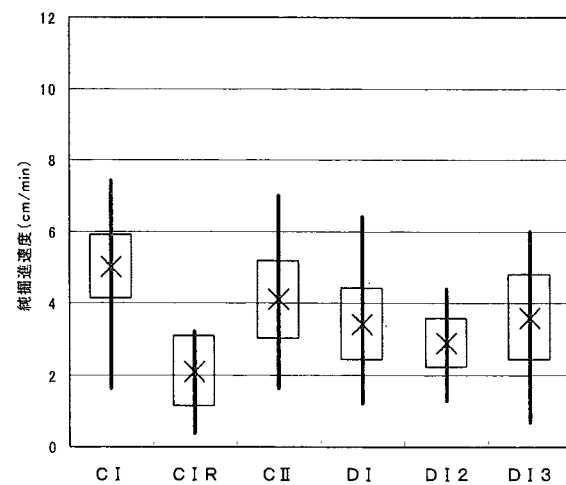
(a) Aトンネル



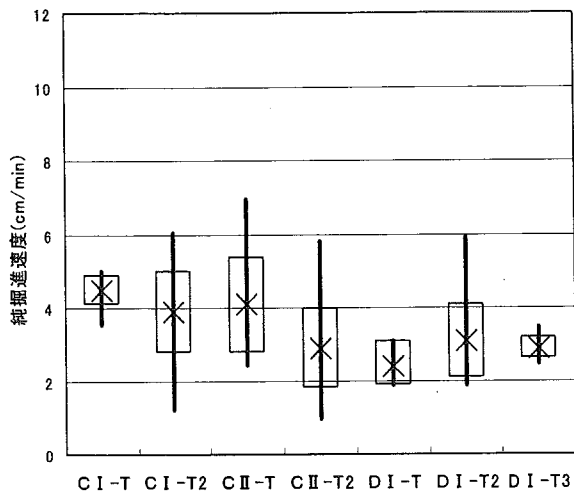
(b) Bトンネル



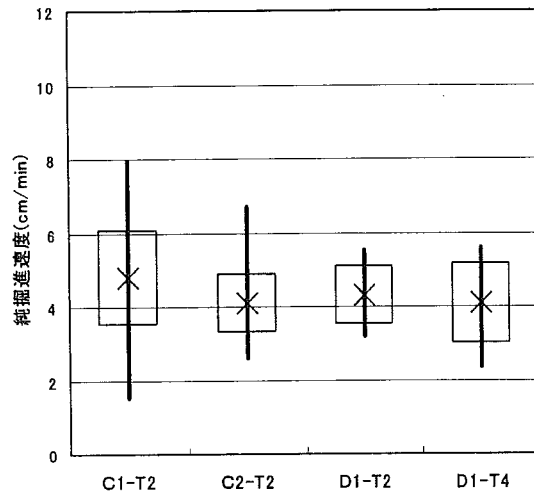
(c) Cトンネル



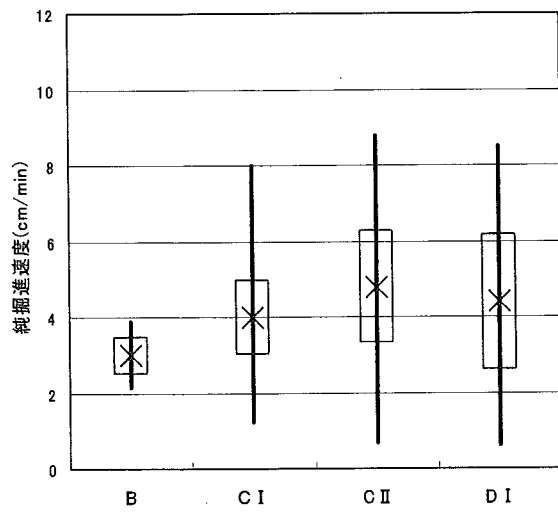
(d) Dトンネル



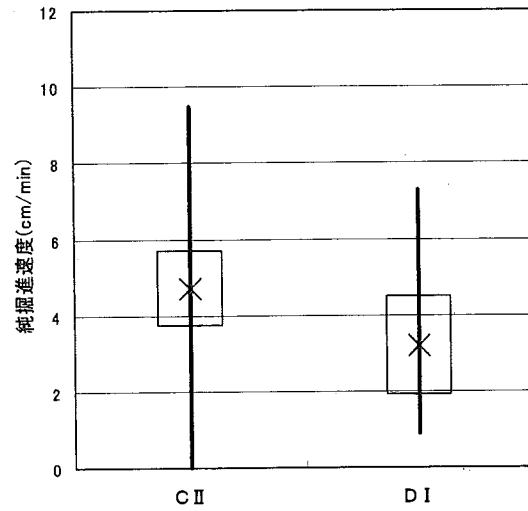
(e) E トンネル



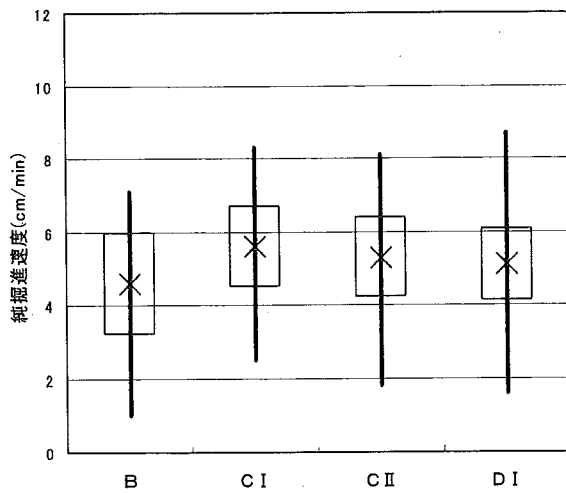
(f) F トンネル



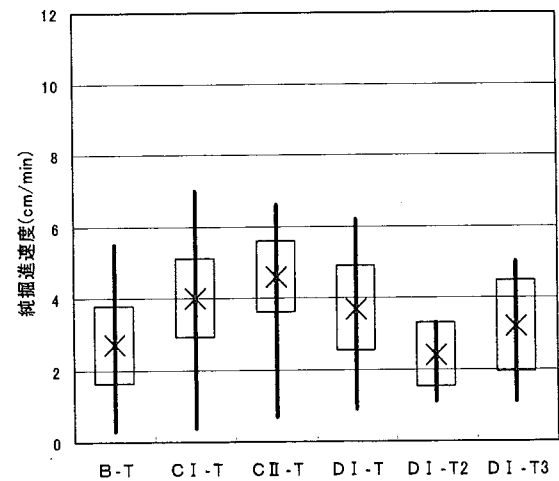
(g) G トンネル



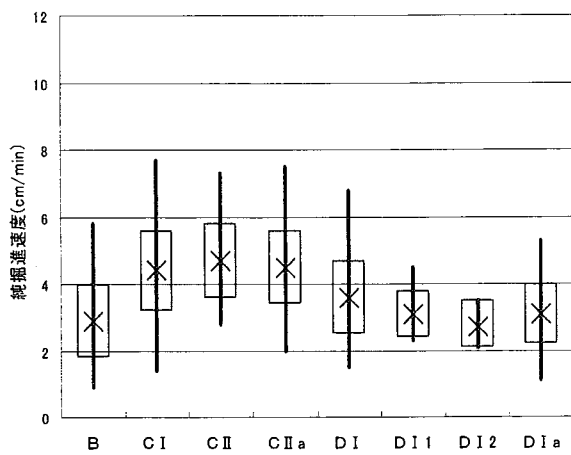
(h) H トンネル



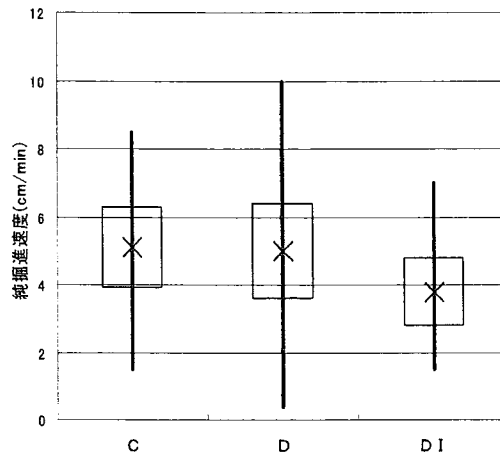
(i) I トンネル



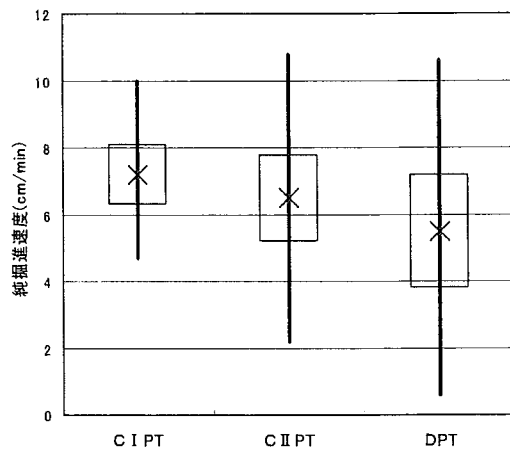
(j) J トンネル



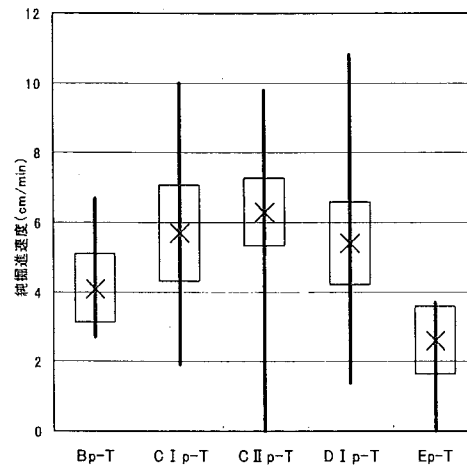
(k) Kトンネル



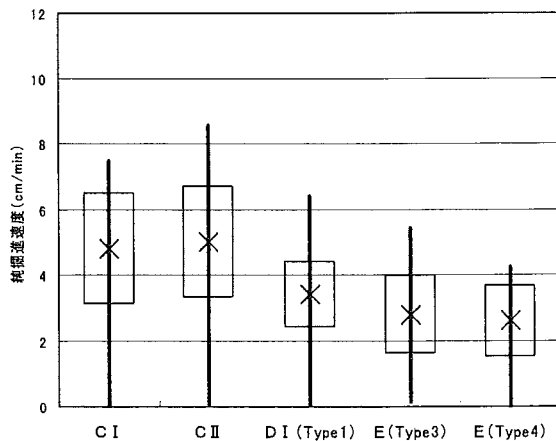
(l) Lトンネル



(m) Mトンネル



(n) Nトンネル



(o) Oトンネル

図 3.2.2 各トンネルの純掘進速度と支保パターン

(b) スラスト推力

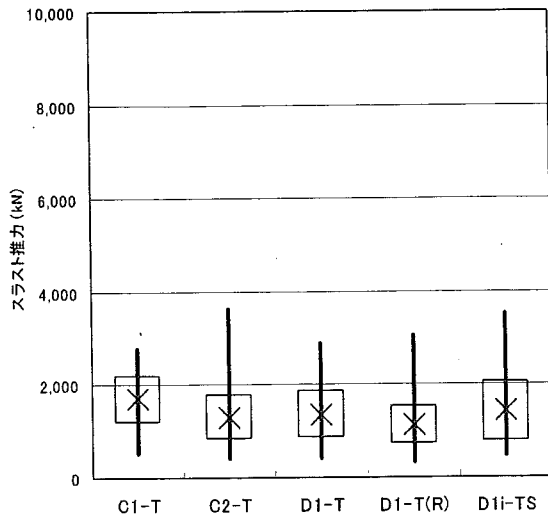
各トンネルの支保パターンとスラスト推力の関係を図 3.2.3 に示す。これによると、スラスト推力は、0 から 8000kN の範囲に分布していることが分かる。

AトンネルとBトンネルは支保パターンによらずほぼ一定のスラスト推力が得られている。その値はAトンネルで 2000kN 程度以下、Bトンネルで 2000 から 3000kN 程度である。

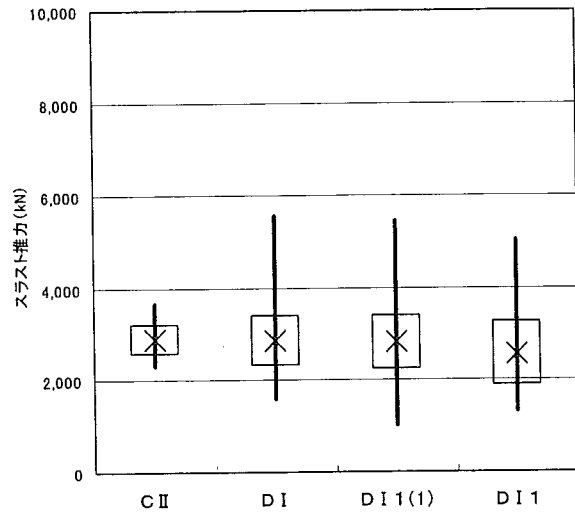
対して、C、Oトンネルでは、支保規模が増加するにつれて、スラスト推力が一端減少する。

そしてその後増加し、再度減少するなど波形を描き複雑になっている。D、E、F、K もその同様な傾向が一部見られるものの、総じて支保規模が大きくなるにつれて、スラスト推力が減少している。

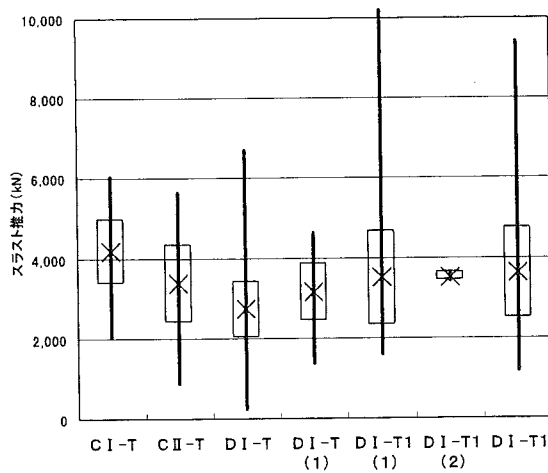
それらのトンネル以外の G、H、I、J、L、M、N トンネルでは、支保規模が大きくなるにつれて、スラスト推力が単調に減少している。



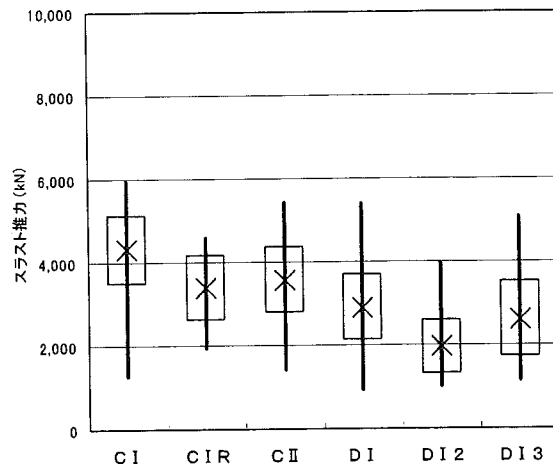
(a) A トンネル



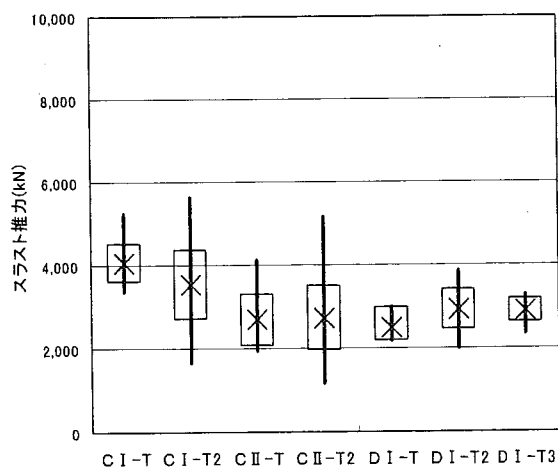
(b) B トンネル



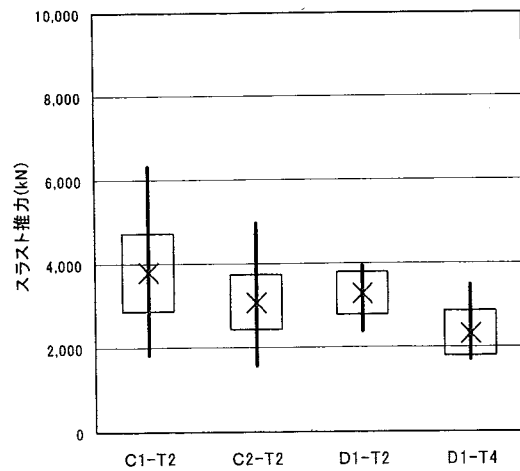
(c) C トンネル



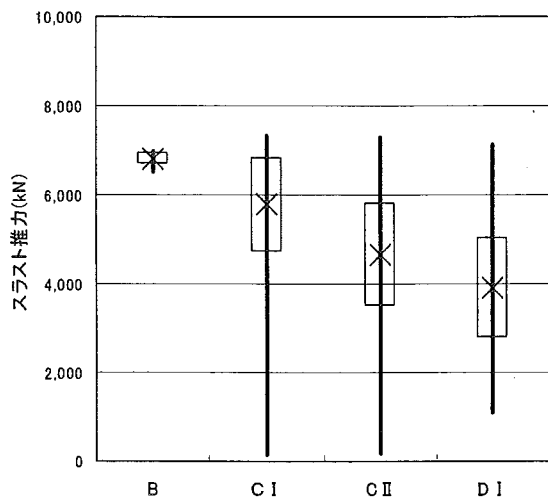
(d) D トンネル



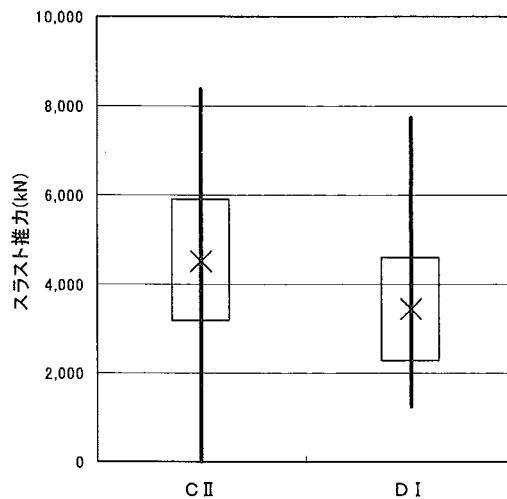
(e) E トンネル



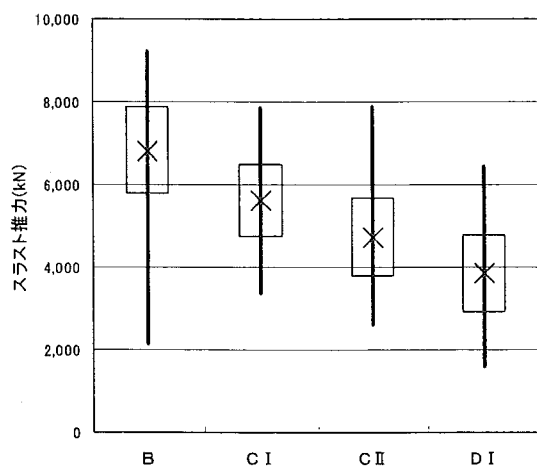
(f) F トンネル



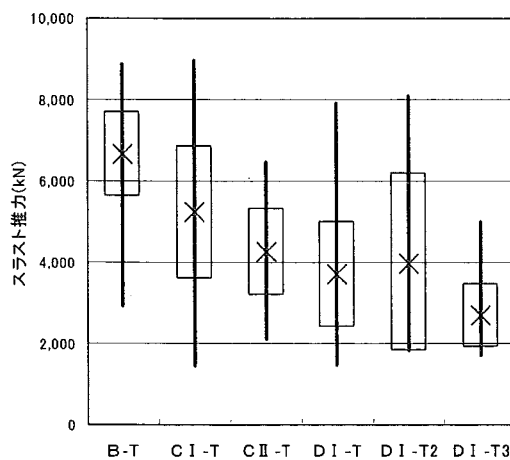
(g) Gトンネル



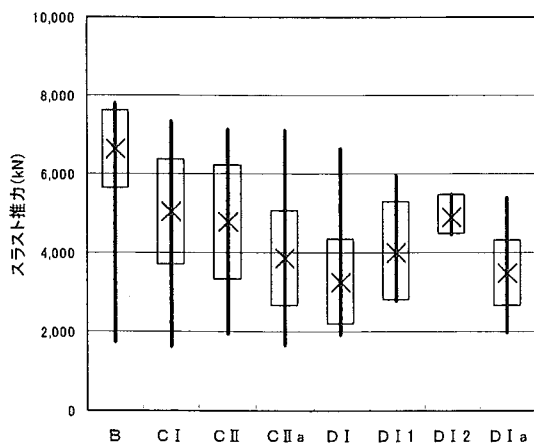
(h) Hトンネル



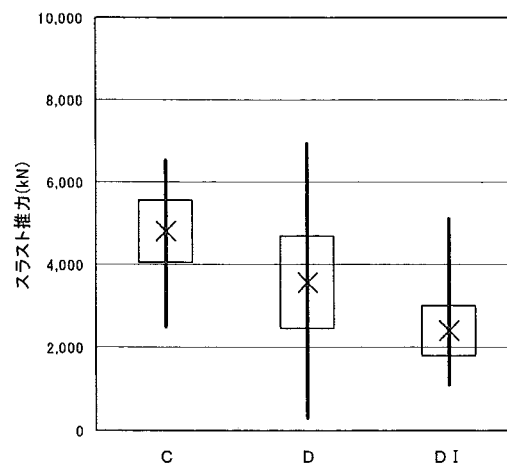
(i) Iトンネル



(j) Jトンネル



(k) Kトンネル



(l) Lトンネル

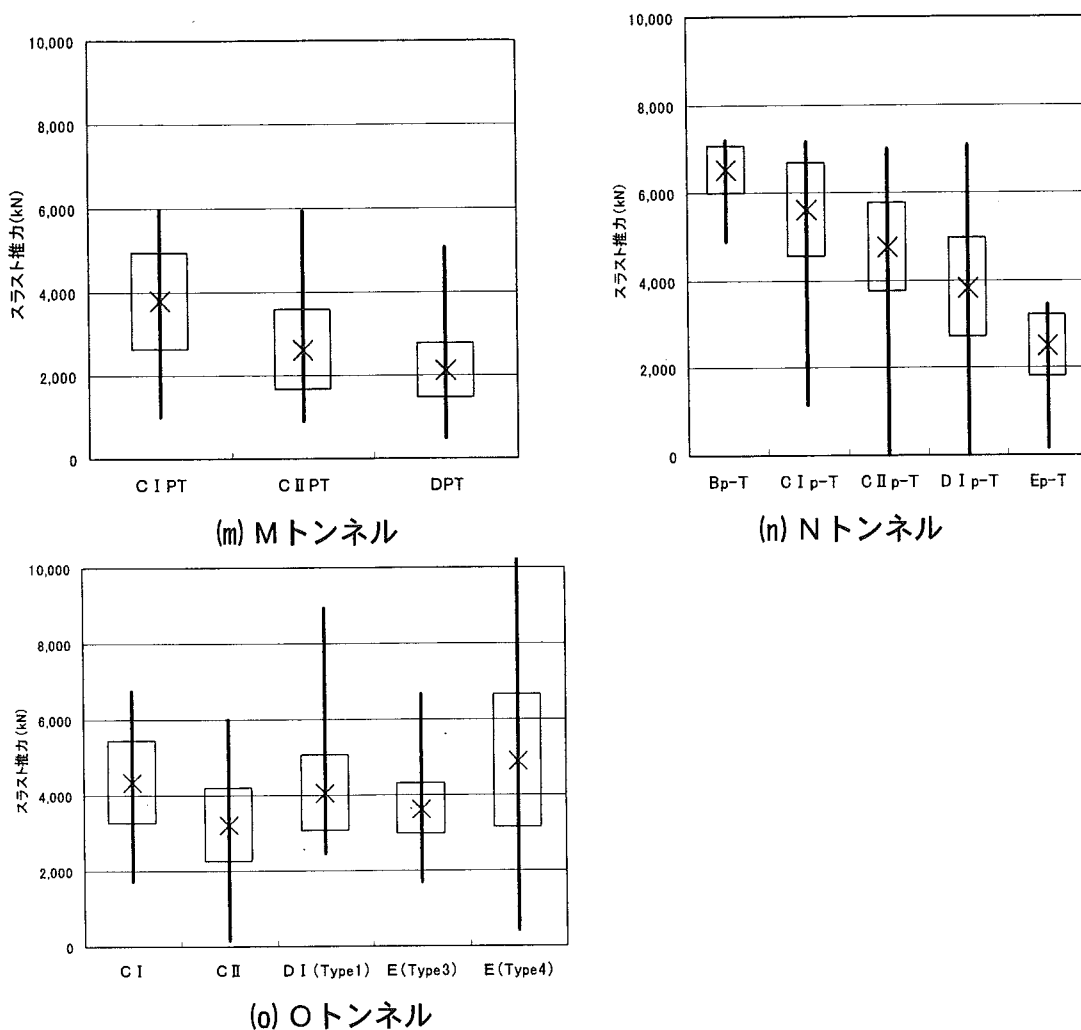


図 3.2.3 各トンネルのスラスト推力と支保パターン

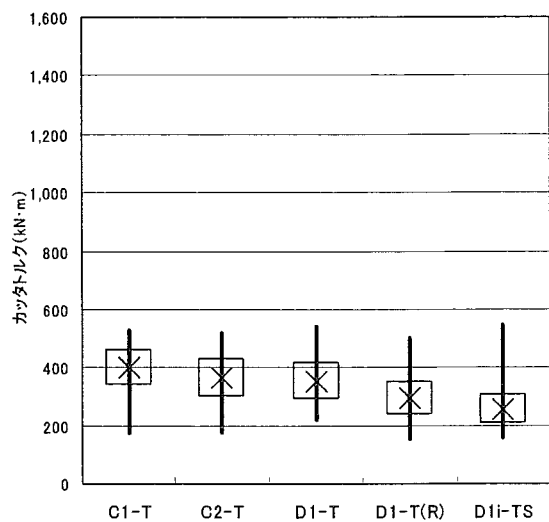
(c) カットトルク

支保パターンとカットトルクの関係を図 3.2.4 に示す。これによると、Cトンネルの支保パターンD 1-T(1)で極めて大きなカットトルクが得られており、異常値等の何らかの不確定要素が混入した可能性が高い。それ以外については、おおむね0から1000kNmのカットトルクが得られている。

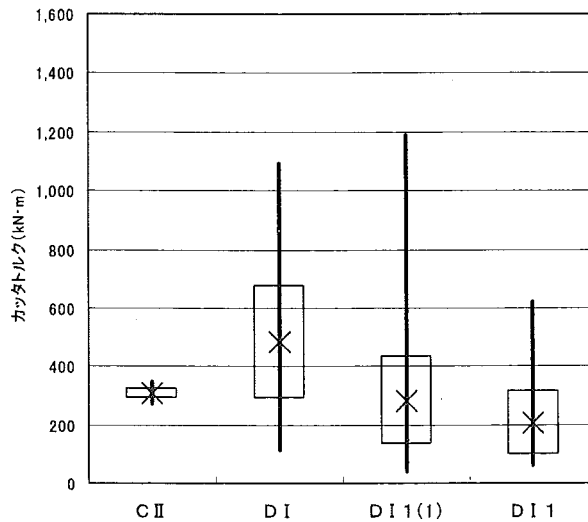
A, G, L, Mトンネルは、支保パターンにはよらずほぼ一定のカットトルクが得られている。その値は、A, L, Mトンネルで200から400kNm程度、Gトンネルでは600から800kNm程度である。

B, C, Dトンネルは、支保規模が大きくなるにつれて、カットトルクが増減を繰り返す複雑な挙動となっている。

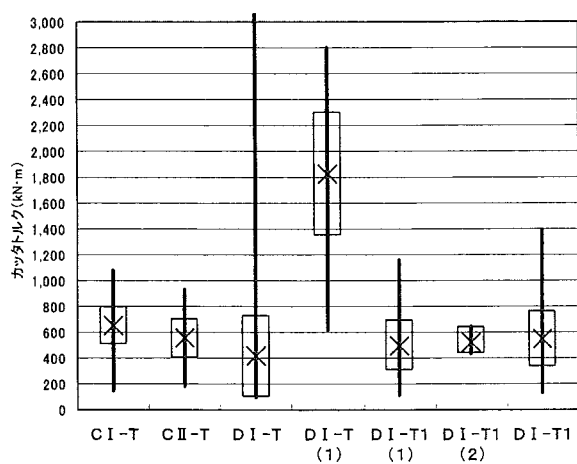
対して、E, F, H, I, J, K, N, Oトンネルといった大部分のトンネルは、支保規模が増大するにつれて、カットトルクは減少している。



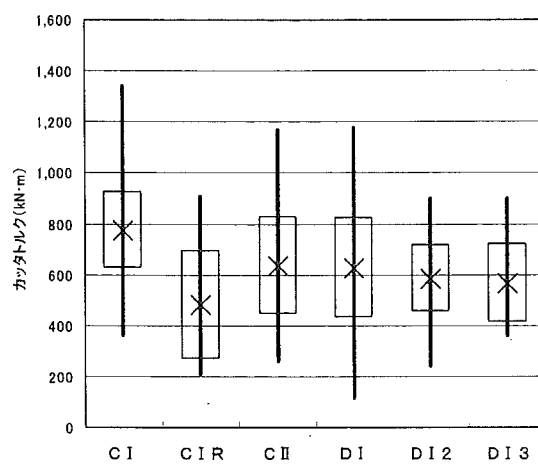
(a) A トンネル



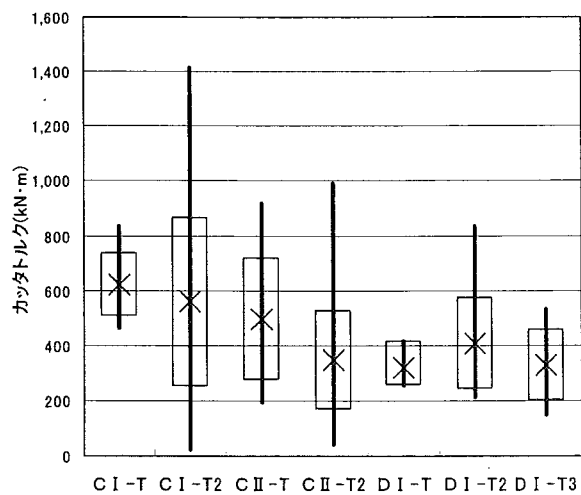
(b) B トンネル



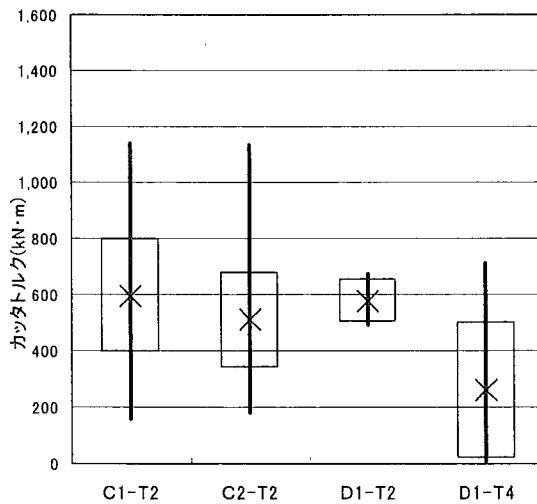
(c) C トンネル



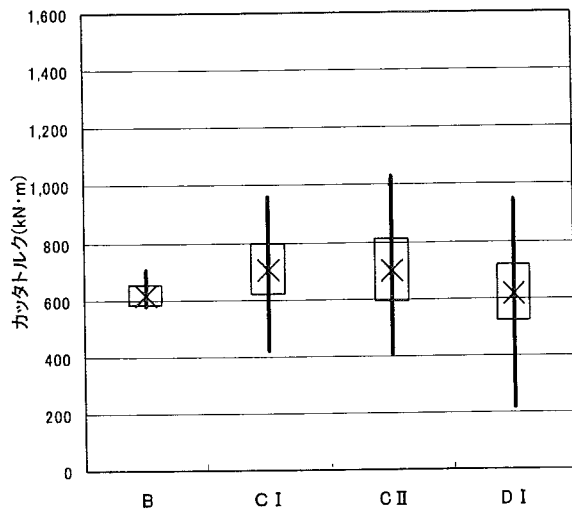
(d) D トンネル



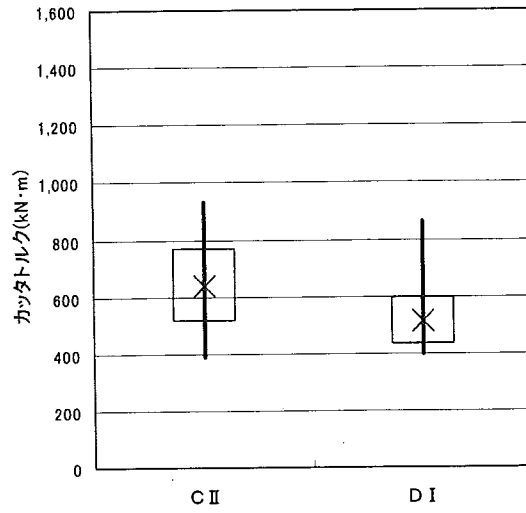
(e) E トンネル



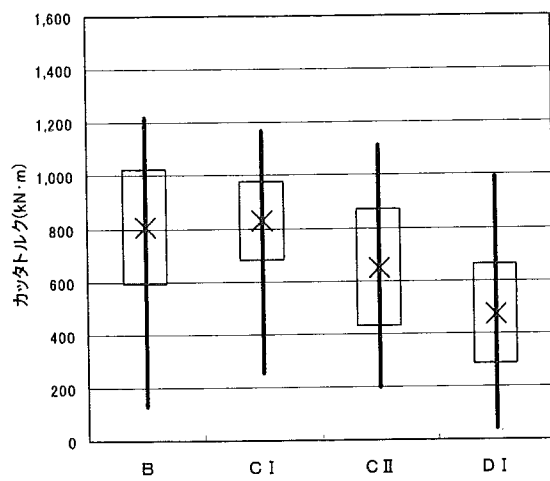
(f) F トンネル



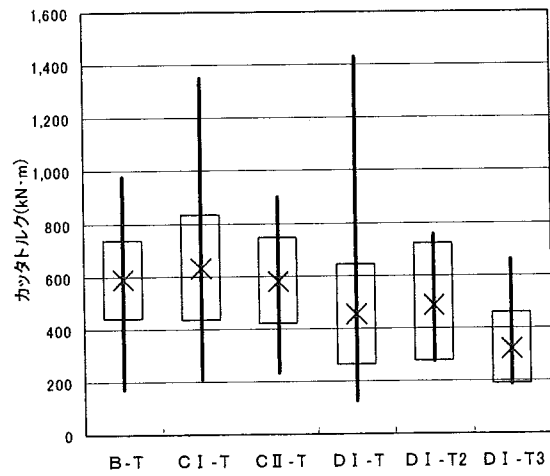
(g) Gトンネル



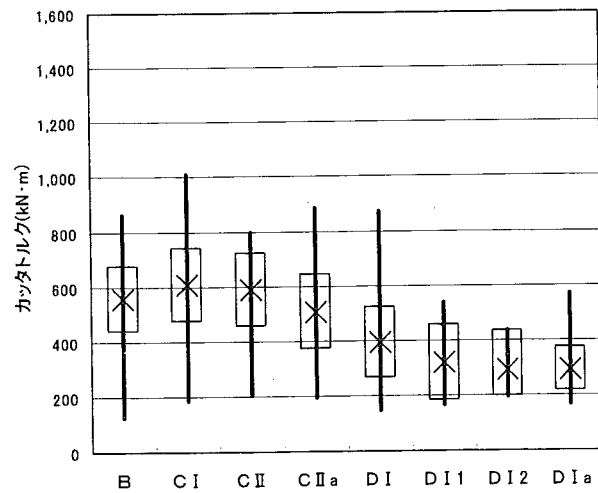
(h) Hトンネル



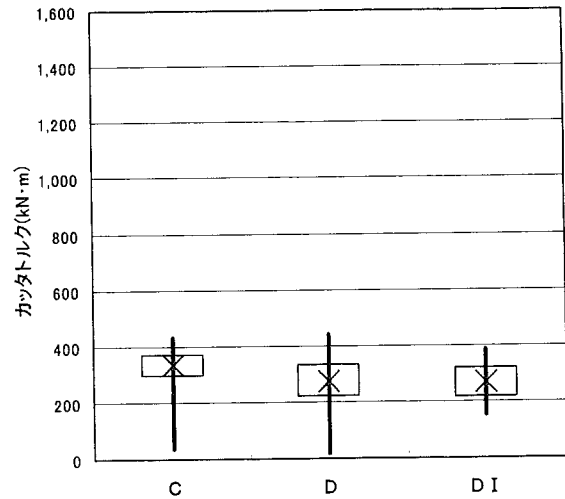
(i) Iトンネル



(j) Jトンネル



(k) Kトンネル



(l) Lトンネル

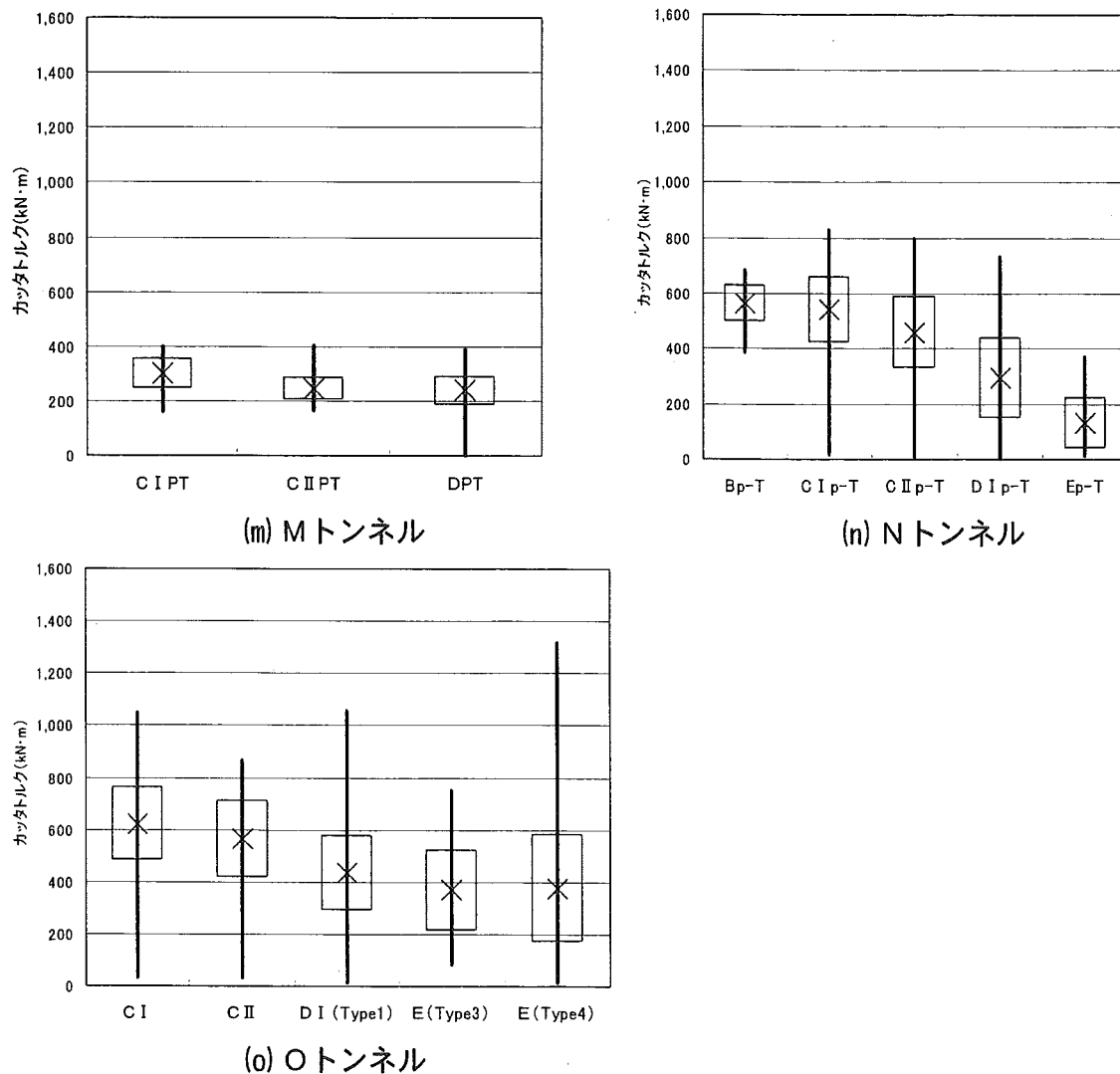


図 3.2.4 各トンネルのカッタトルクと支保パターン

(d) カッタ貫入量 (切込み量)

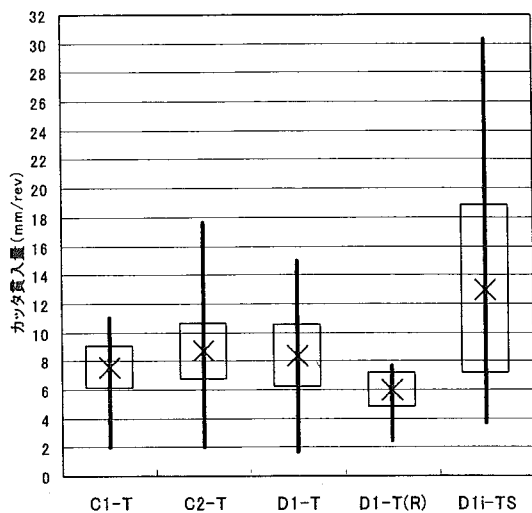
支保パターンとカッタ貫入量 (切込み量) の関係を図 3.2.5 に示す。これによるとカッタ貫入量 (切込み量) は、Cトンネルにおいては極端に大きな値が計測されているものの、それ以外では、およそ、4 から 10mm/回転が多く、幅広く採っても 0 から 20mm/回転である。Cトンネルは、カッタトルクも極端に大きな値が計測されており、何らかの異常値が含まれている可能性が高い。

Aトンネルは、支保規模が増大するにつれてカッタ貫入量が増加、減少、増加する、波形を成している。

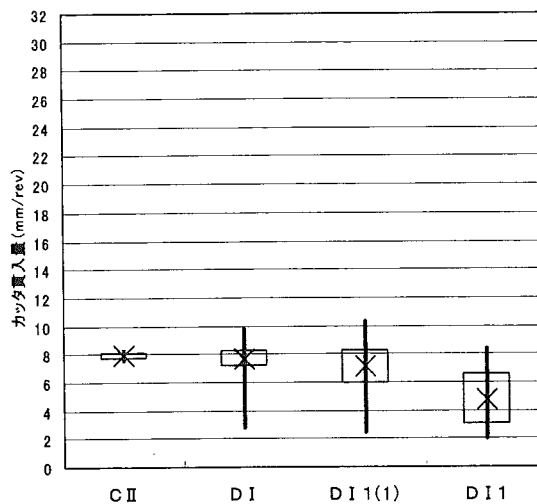
また、B、D、E、F、H、I、J、K、L、M、Oトンネルといったほとんどのトンネルでは、支保規模が変化してもカッタ貫入量があまり大きく変動していないことが分かる。

一方、G、Nトンネルでは、支保規模が増大するにつれてカッタ貫入量が大きくなっていることが分かる。それと同時に、両トンネルでは、カッタ貫入量が大きくなるにつれて、同じ支保規模の中でのカッタ貫入量のばらつき、最大値と最小値の差が大きくなっていることも分かる。

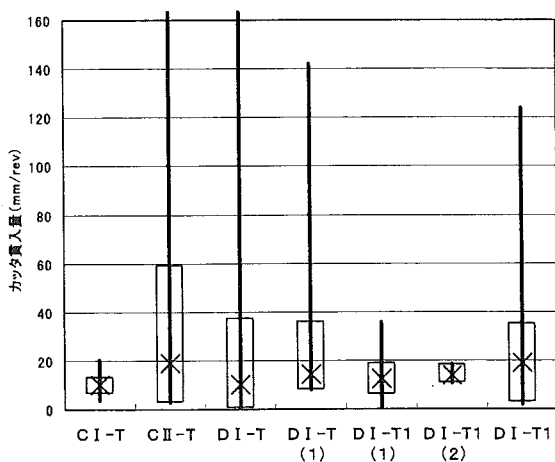
切込み量 (切込み量) は岩石の節理等の影響を受けている可能性もあり、本検討結果を総じて見ても、カッタ貫入量 (切込み量) は、支保規模との相関が乏しい指標であると言える。



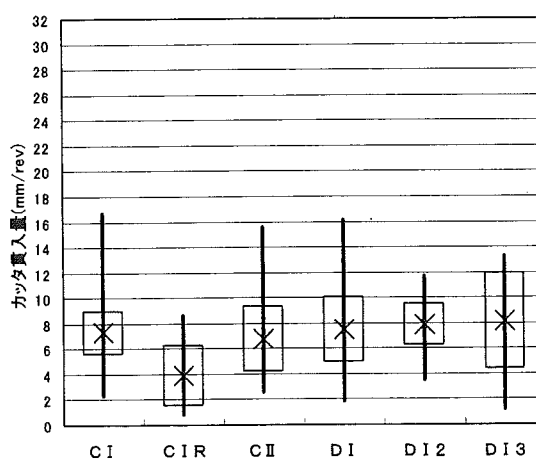
(a) A トンネル



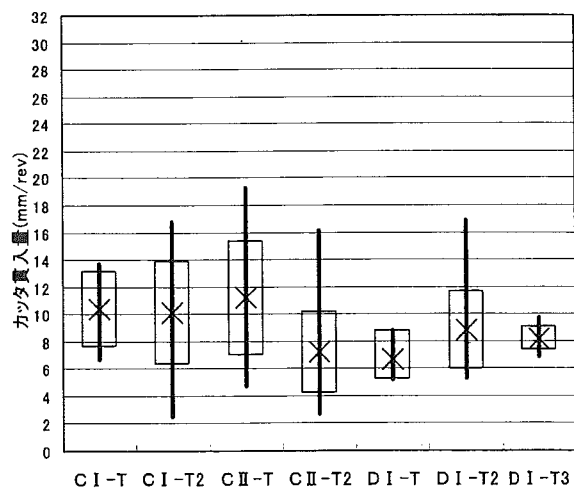
(b) B トンネル



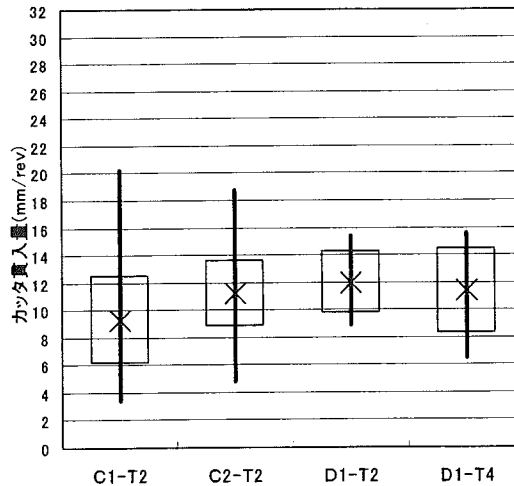
(c) C トンネル



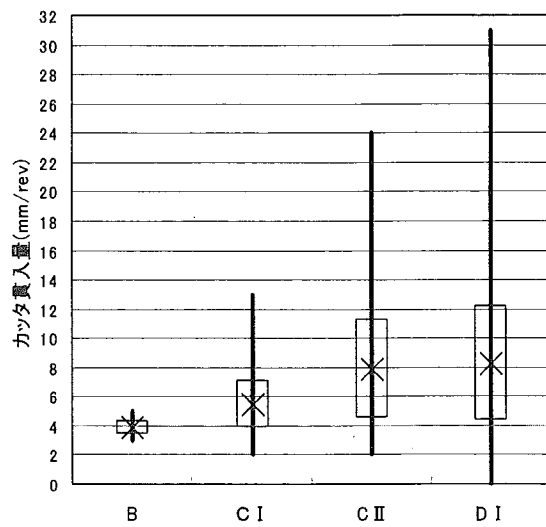
(d) D トンネル



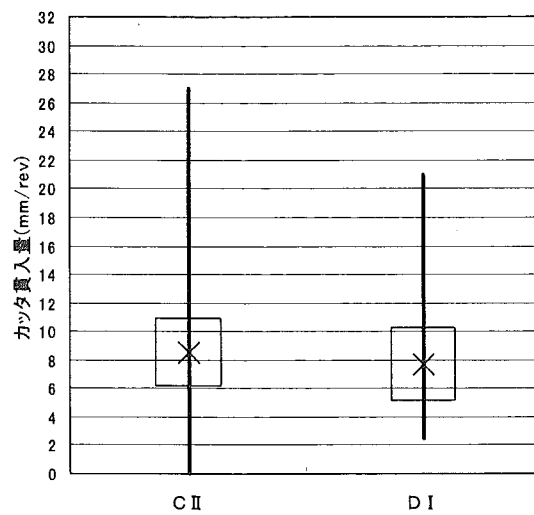
(e) E トンネル



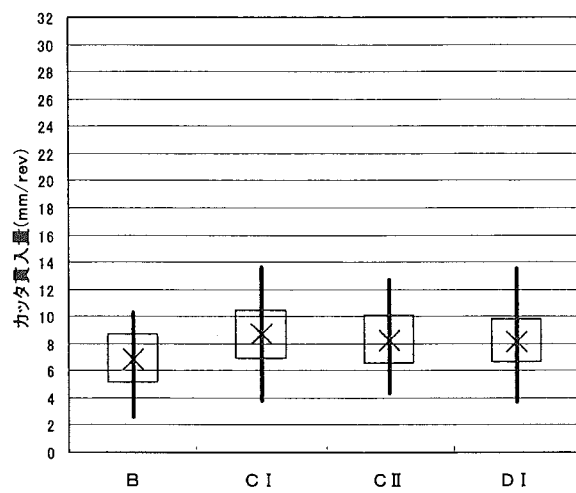
(f) F トンネル



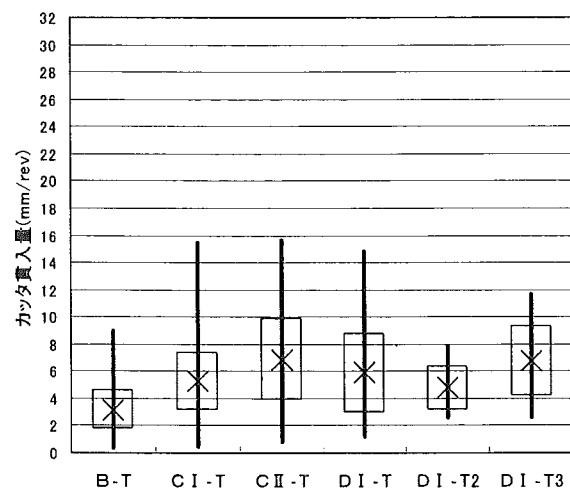
(g) Gトンネル



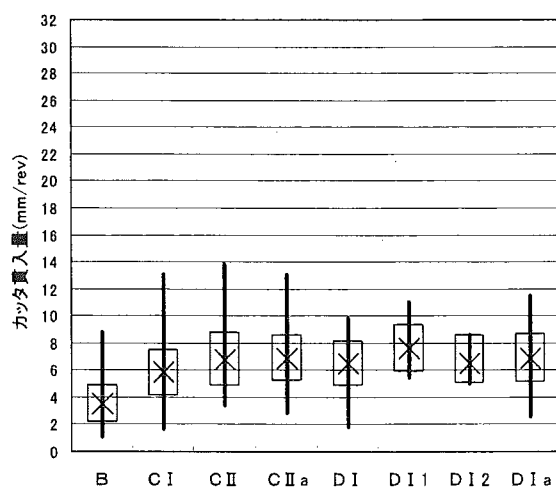
(h) Hトンネル



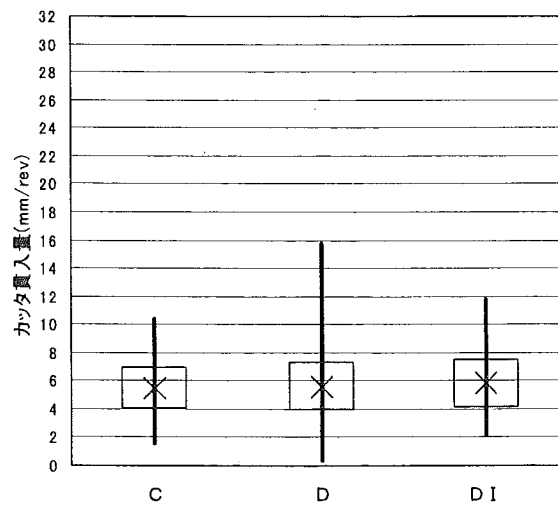
(i) Iトンネル



(j) Jトンネル



(k) Kトンネル



(l) Lトンネル

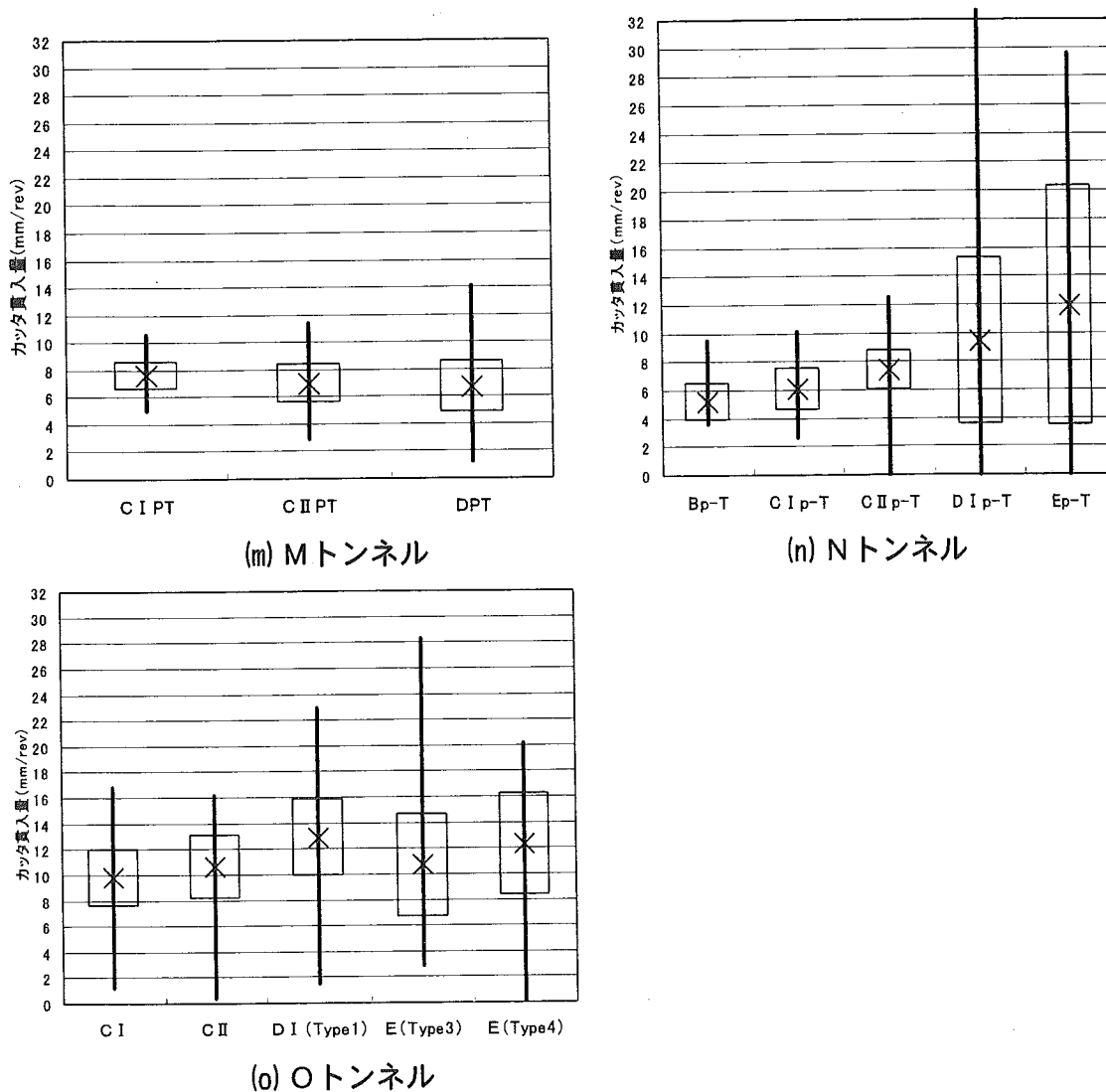


図 3.2.5 各トンネルのカッタ貫入量と支保パターン

(2) 機械データ間の相関関係と支保パターン

ここでは、AからOの各トンネルについて、主要な機械データ間の関係と実施された支保パターンとの相関を示す。示すデータは、1次機械データの代表的なものでスラスト推力とカッタトルク、および2次機械データのうちスラスト推力による推定岩盤強度とカッタトルクによる推定岩盤強度である。これにより、機械データのダイレクト値およびそれより算出した岩盤強度と支保パターンの関係を分析する。

なお、結果は、散布図と呼ばれるグラフで示す。

(a) スラスト推力、カッタトルクの関係と支保パターン

スラスト推力とカッタトルクを支保パターン毎にプロットしたものを図 3.2.6 に示す。これによるとトンネルによって分布範囲が異なるもののおおよそスラスト推力とカッタトルクは比例関係が認められる。また、トンネルごとに顕著なものとそうでないものの差が大きいですが、おおよそ支保規模が大きくなるとこれらの機械データが若干下がる傾向にあることが分かる。

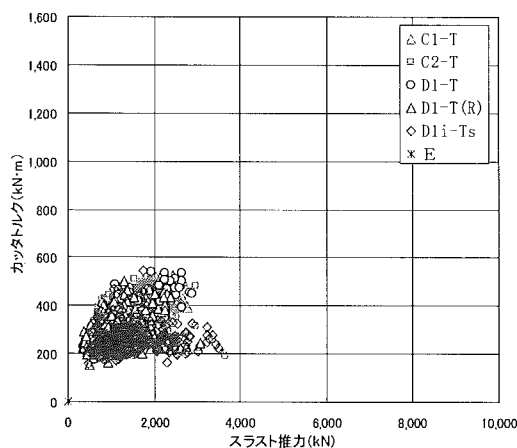
A、Oトンネルは、スラスト推力とカッタトルクの比例関係はあまり顕著ではない。また、分布の仕方はAトンネルが密集して、Oトンネルは万遍なくデータが分布している。

これに対し、C、D、E、F、I、J、K、Nトンネルは、スラスト推力とカッタトルクがお

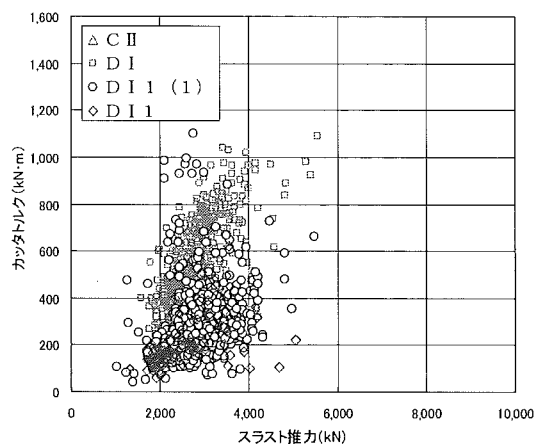
およそ比例している。また、G、Hトンネルもスラスト推力とカットトルクが線形関係にあるとも言えるが、これら2つのトンネルには、スラスト推力で2000kN、カットトルクで400kNmの下限值があるように見える。これらの下限値が表れた原因としては、機械での摩擦や後続台車等の施工設備の影響などが含まれている可能性も考えられる。なお、他のトンネルでも下限値をもつ傾向はあまり明確ではないが見られる場合もある。

Bトンネルは、カットトルクが大きく分布しているのに対して、スラスト推力が密集することで、この散布図が縦長になっている。一方、L、Mトンネルでは、その逆で、スラスト推力が大きく分布しているのに対して、カットトルクが密集することでこの散布図が横長になっている。

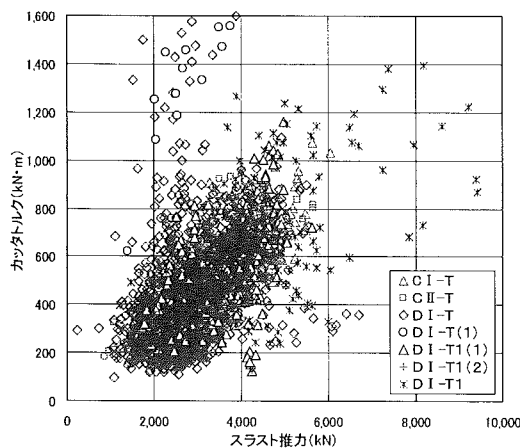
代表的な機械データであるスラスト推力とカットトルクがこれらのどの形態に当てはまるかは、機械データを用いた支保選定上着目すべき機械データを見誤らないようにするため重要であると考えられる。したがって、施工の早期にスラスト推力とカットトルクがどのような関係にあるかを見極めることが必要であると考えられる。



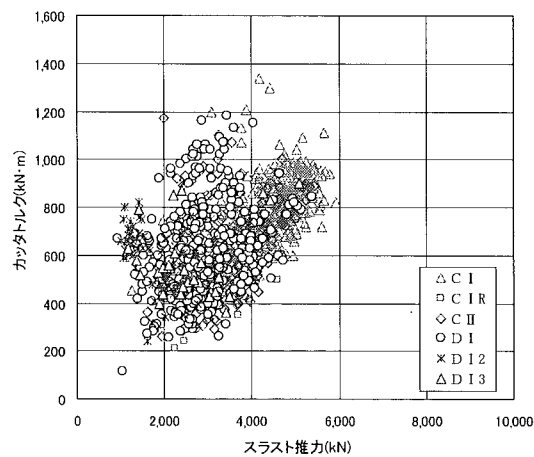
(a) Aトンネル



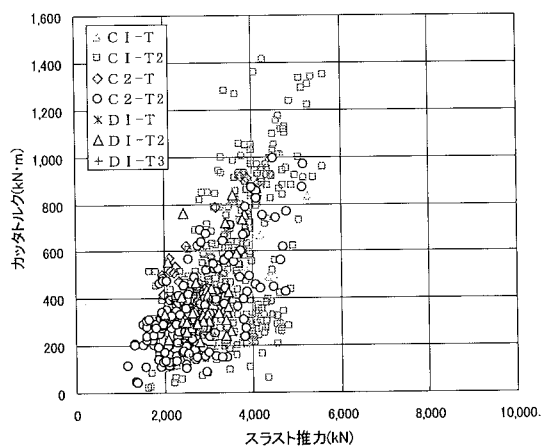
(b) Bトンネル



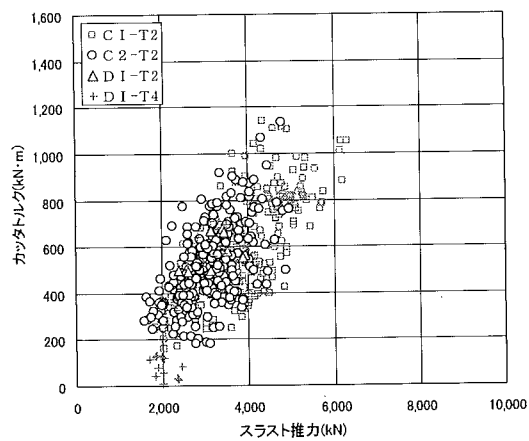
(c) Cトンネル



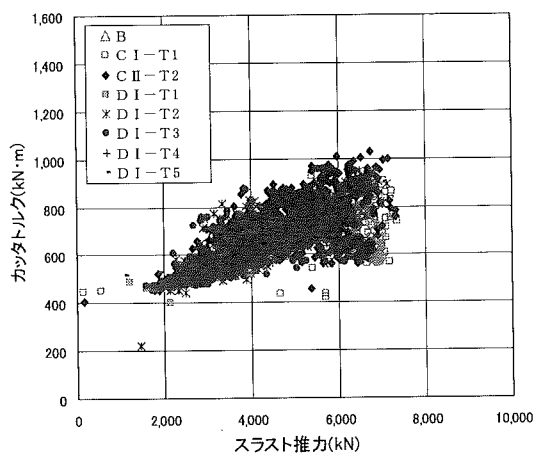
(d) Dトンネル



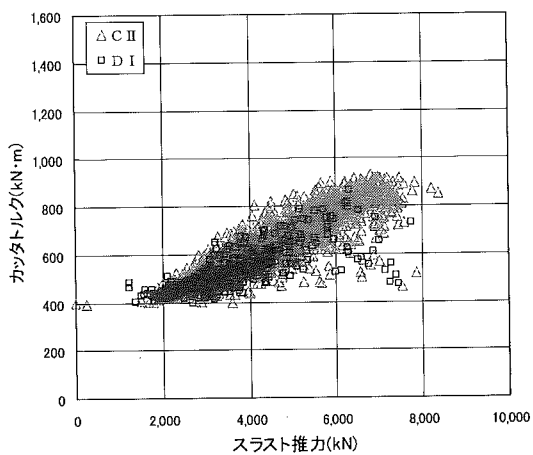
(e) E トンネル



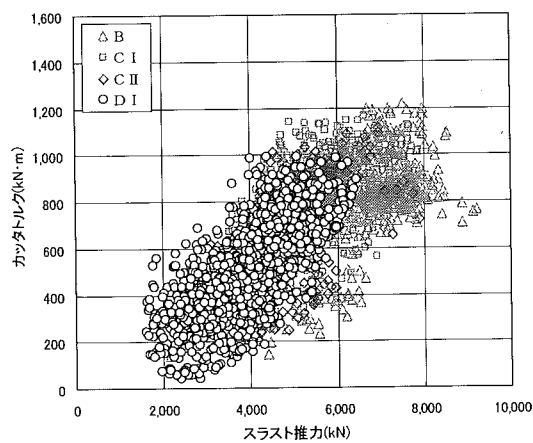
(f) F トンネル



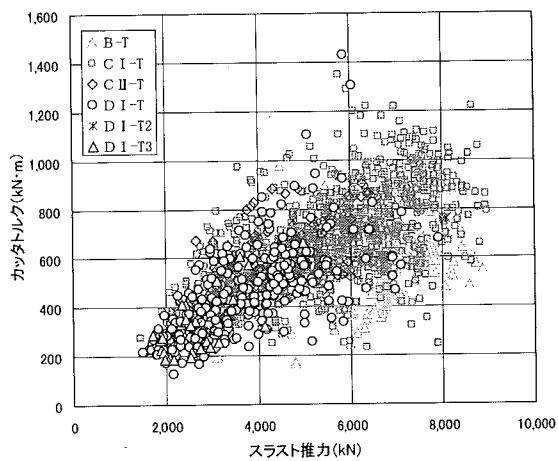
(g) G トンネル



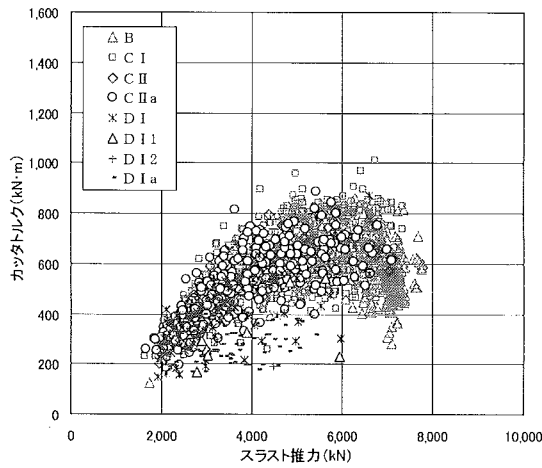
(h) H トンネル



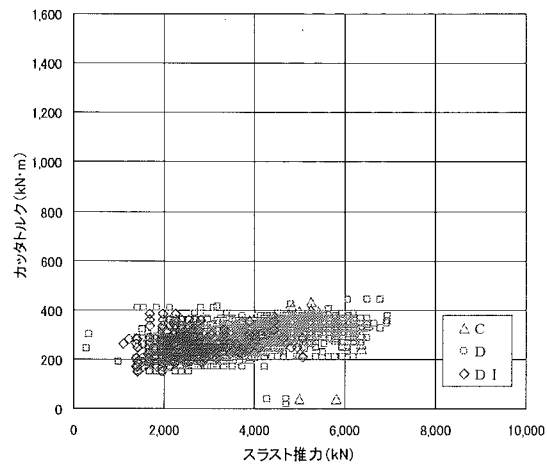
(i) I トンネル



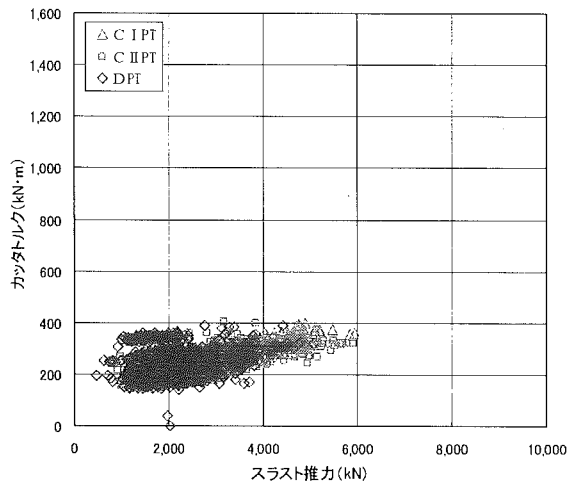
(j) J トンネル



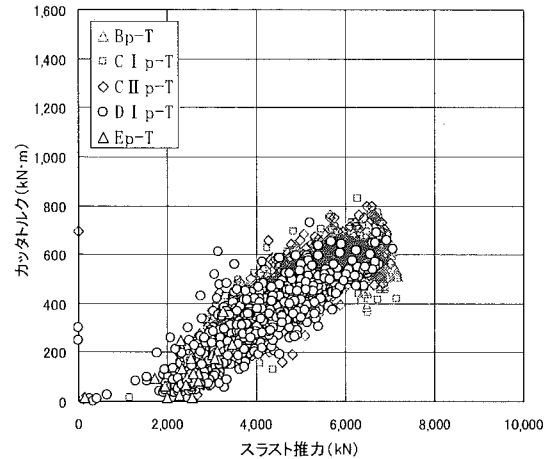
(k) Kトンネル



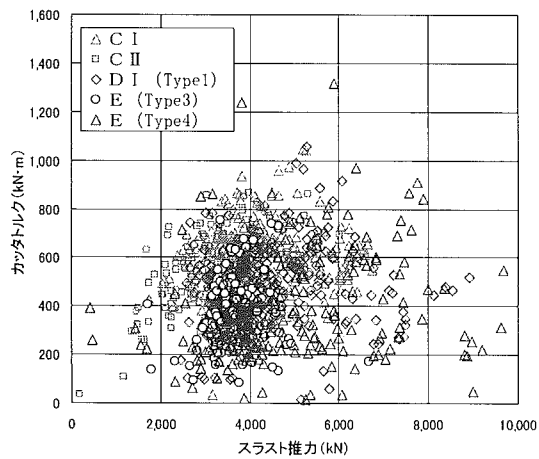
(l) Lトンネル



(m) Mトンネル



(n) Nトンネル



(o) Oトンネル

図 3.2.6 各トンネルのスラスト推力, カッタートルクと支保パターン

(b) 各種推定岩盤強度と支保パターン

スラスト推力による推定岩盤強度とカッタートルクによる推定岩盤強度を支保パターン毎にプロットしたものを図 3.2.7 に示す。

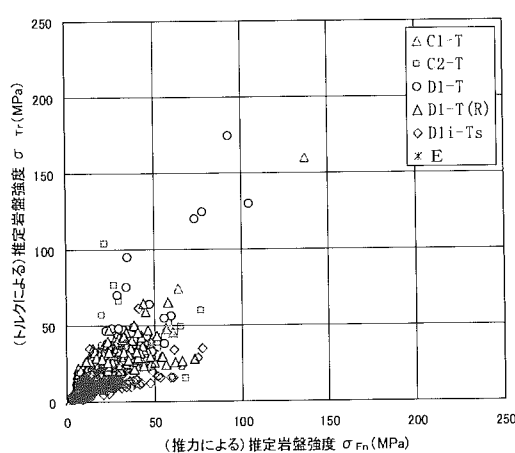
なお、この時必要な定数 c_1 , c_2 は TBM の緒元(掘削径, カッタ径, カッタ間隔など)により異なるものである。しかし、本研究では、データの入手状況等の理由から、掘削径が等しいトンネル

では、定数 c_1 , c_2 も等しいと仮定した。そして、その値は、シュミットハンマー換算強度データより推定し、掘削径 3.5m の時は A トンネルの値($c_1=0.11\text{m}$, $c_2=1.15\text{m}^{1.5}$), 4.5m の時は N トンネルの値($c_1=0.07\text{m}$, $c_2=1.25\text{m}^{1.5}$), 5m の時は C トンネルの値($c_1=0.03\text{m}$, $c_2=0.36\text{m}^{1.5}$)とした。

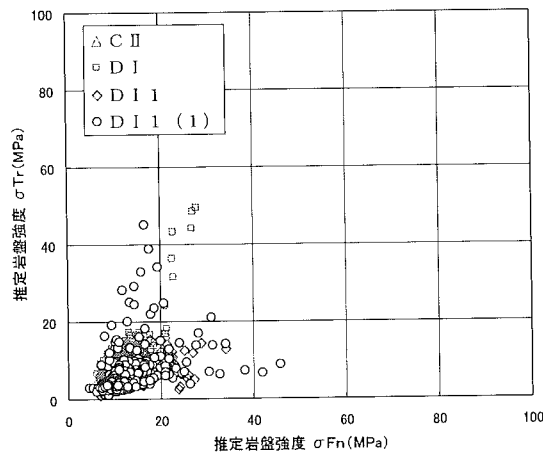
図 3.2.7 によるとスラスト推力による推定岩盤強度とカットトルクによる推定岩盤強度はおおよそ比例関係にあり、かつ推定岩盤強度が大きくなり地山が良好になるにつれて、支保規模が小さくなっていることが分かる。ただ、岩盤強度自体は、推定方法によらず地山固有の値であり、スラスト推力によるものとカットトルクによるものは、傾き 1 の比例関係になるはずであるが、多くのトンネルではそのようになっていない。

A, B, M, O トンネルは、推力、トルクによる推定岩盤強度がある範囲を持ちながら扇状に分布しており、あまり顕著でないものの比例している。対して、その他のトンネルは、両者による推定岩盤強度が比較的分散せず比例関係にあることが分かる。しかし、その傾きとしては、やや緩やかであり、言い換えればスラスト推力による岩盤強度は、カットトルクによるものより比較的小さめな値として算出されていることが分かる。したがって、機械データより岩盤強度を算定する場合には、スラスト推力によるものが小さい値である可能性が高いということに注意しなければならない。

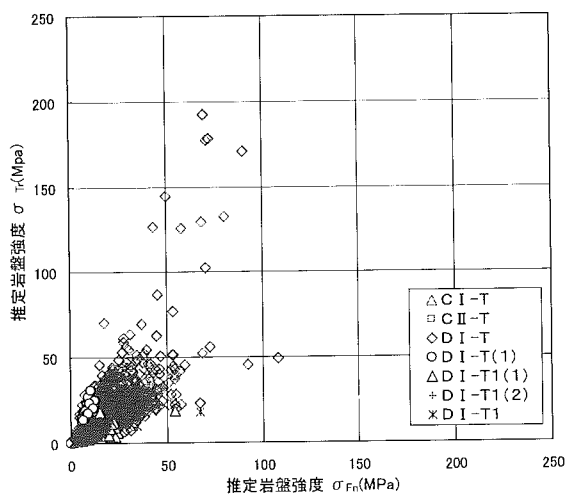
なお、この結果は、本検討で仮定した定数 c_1 , c_2 の決定法に原因がある可能性があり、注意が必要である。



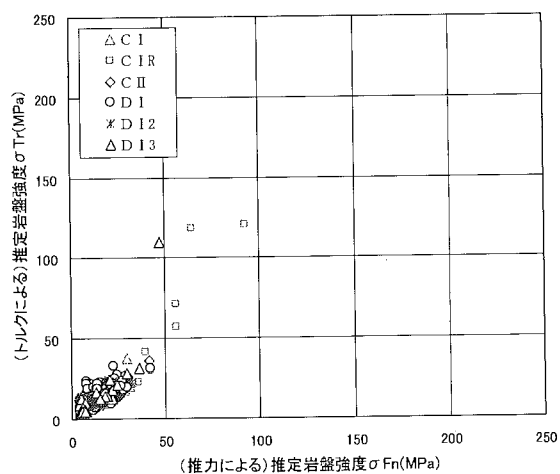
(a) A トンネル



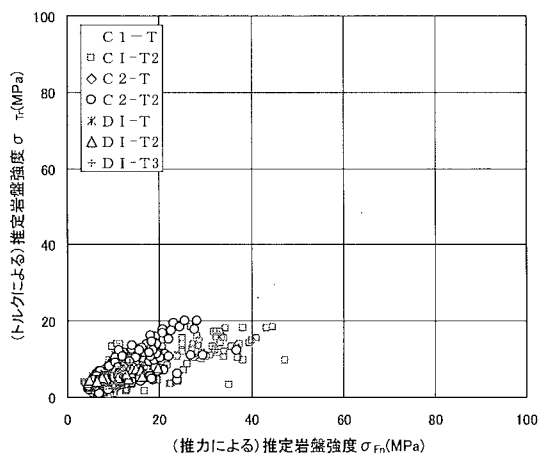
(b) B トンネル



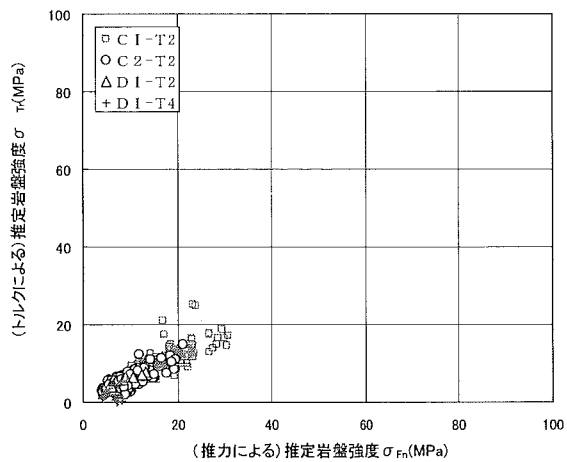
(c) C トンネル



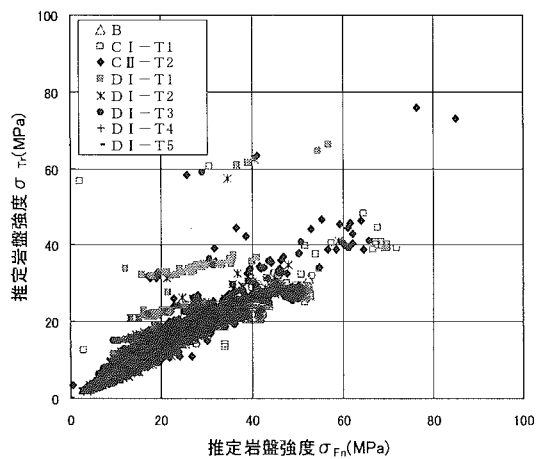
(d) D トンネル



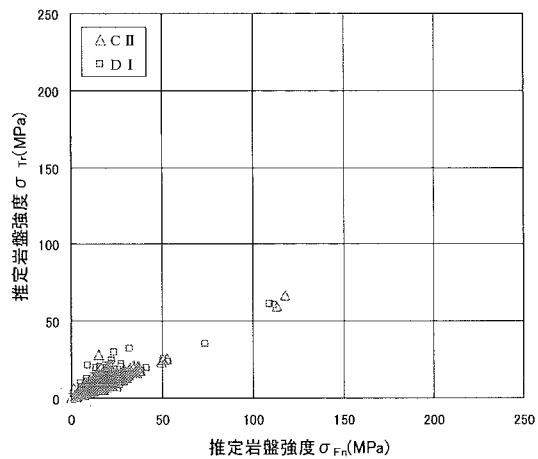
(e) E トンネル



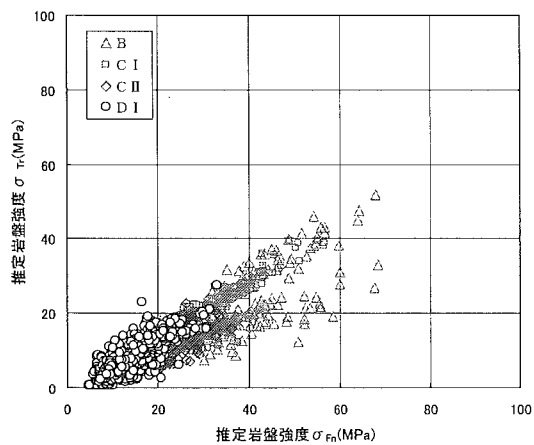
(f) F トンネル



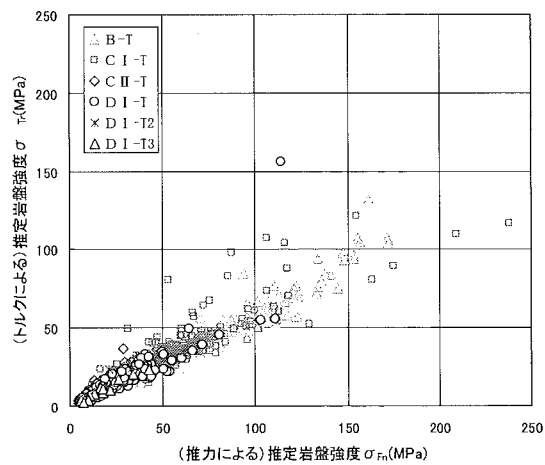
(g) G トンネル



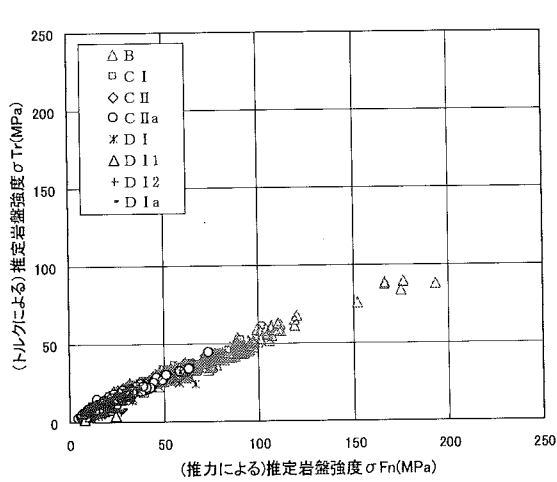
(h) H トンネル



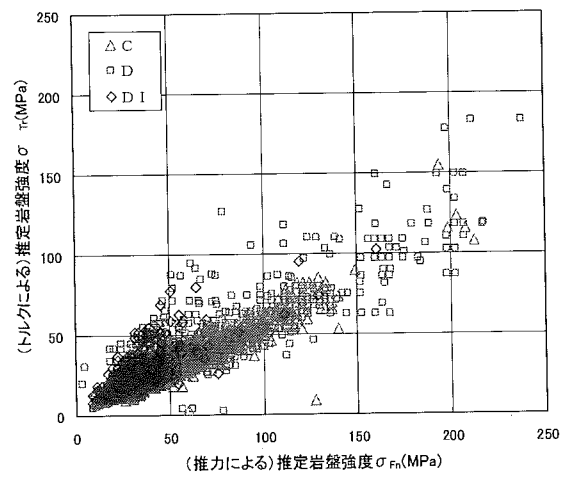
(i) I トンネル



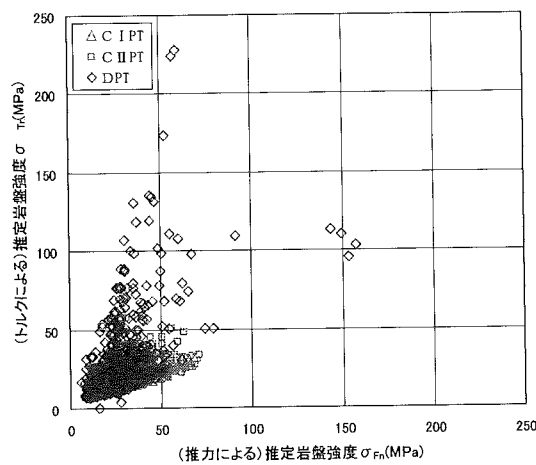
(j) J トンネル



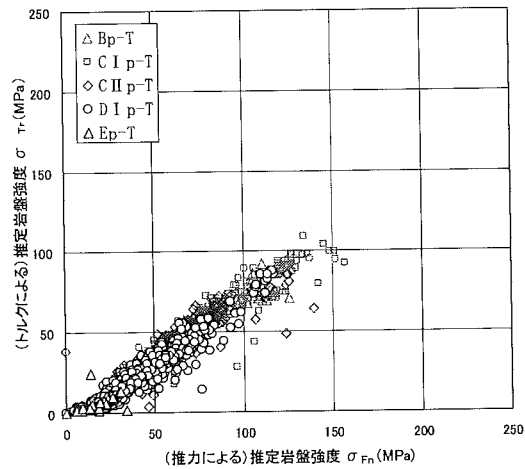
(k) Kトンネル



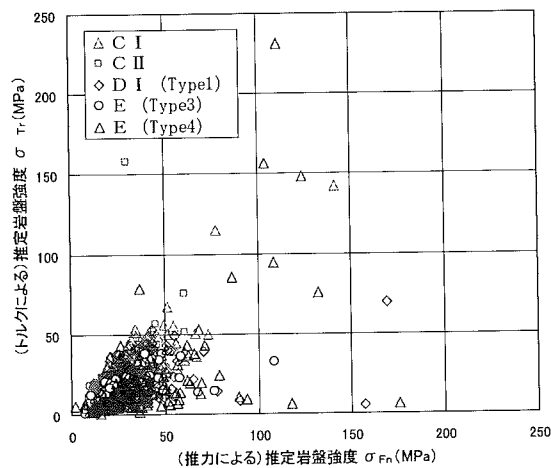
(l) Lトンネル



(m) Mトンネル



(n) Nトンネル



(o) Oトンネル

図 3.2.7 各トンネルのカッタ貫入量と支保パターン

(3) 平均的な機械データと支保パターンの関係

ここでは、各トンネルの支保パターンごとの機械データを平均しプロットしたものを図 3.2.8 に示す。なお、この平均は、支保パターン内におけるばらつきを持つデータを単純に平均したものであり、周辺岩種やその他条件を考慮していないことに注意を要する。

(a) に純掘進速度と支保パターンの関係を示す。純掘進速度は地山条件が良好で支保規模が小さい場合と悪く支保規模が大きい場合に低下する傾向があるとともに、地山が悪い場合の一部では純掘進速度が増加する場合もあった。これは地山条件が良好なほど掘進しにくくなることによる速度低下と、地山状況が不良な場合の掘進に慎重を期することによる速度低下、また逆に岩自体の掘進は容易であることからの速度増加が複合しているためと考えられる。すなわち、支保パターンがBもしくはL程度に該当する地山以外であれば、平均的に見れば純掘進速度と支保パターンの間に関連性は見られる。しかし、純掘進速度は施工上のサイクル等の制約条件も受けやすく、支保パターンとの関連性を現場にて議論することに対しては困難であると考えられる。

(b) にカット回転速度と支保パターンとの関係を示す。なお、EおよびFトンネルでは時系列でのカット回転速度が算定されておらず、比較が不可能であった。カット回転速度は地山条件が悪く支保規模が大きくなるほど低下する傾向が全体の平均値をとれば読みとれる。しかし、カット回転速度そのものの値の低下の度合いが小さいことから、実際の施工中のリアルタイムの値から支保との関連を導き出す場合の指標として用いる場合は検討が必要であると考えられる。また、異なったトンネル間でのばらつきも大きいことから、カット回転速度だけから定量的な判断を行うことは困難であると考えられる。

(c) にスラスト推力と支保パターンとの関係を示す。スラスト推力は、地山条件が良好で支保規模が小さいほどスラスト推力が大きくなっている傾向が見られる。このことは、地山条件が良好となれば、岩盤が強固となり、TBM 推進に大きな力が必要となることが原因と考えられる。しかし、地山条件が悪く、支保パターンがL1、Lとなるにつれて、スラスト推力のばらつきが大きくなっている。このことは、地山条件がかなり悪いと支保規模が多岐にわたるだけでなく TBM 掘進に必要な力にもばらつきが多くなりマシン制御が難しくなることを示唆している。

(d) にカットトルクと支保パターンとの関係を示す。カットトルクも地山条件が良好で支保規模が小さいほどスラスト推力が大きくなっている傾向が見られる。しかし、地山条件が悪く、支保パターンがL1、Lとなるにつれて、カットトルクのばらつきが大きくなっていることはスラスト推力と同様である。

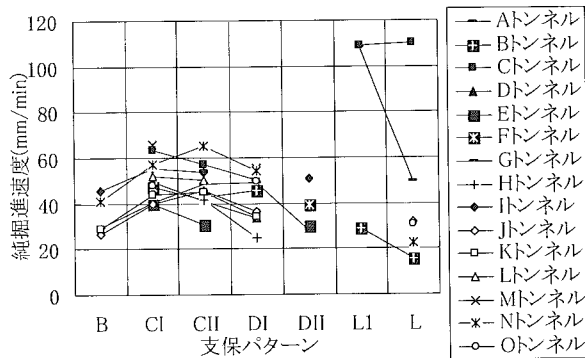
(e) に掘進エネルギーと支保パターンとの関係を示す。掘進エネルギーの傾向はスラスト推力と同様である。これは、本研究の対象の TBM 径がどれも大差なく、スラスト推力から掘削径の影響を除去して掘進エネルギーに換算しても大きな大小関係の変化が生じないことが原因であると考えられる。

(f) に回転エネルギーと支保パターンとの関係を示す。回転エネルギーは、地山条件が良好で支保規模が小さいほど大きくなっている傾向が見られる。また、支保パターンとの相関関係がカットトルクに比べ向上していることが分かる。このことから、カットトルクを回転エネルギーに変換することは、支保パターン選定の指標とするためには有効であると言える。

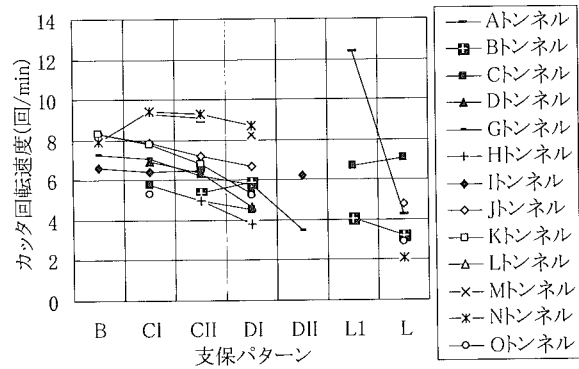
(g) に掘削体積比エネルギーと支保パターンとの関係を示す。これによると、掘削体積比エネルギーが回転エネルギーとほぼ同傾向にあることが分かる。これは、掘削体積比エネルギーのうち回転エネルギーの占める割合が大きいことが原因と考えられる。

以上より、施工上の制約を受けやすい 1 次の機械データと支保パターンの関連性については支保パターンの間に関連性は見られるものもある。しかし、トンネル間、または支保パターン毎でのばらつきが大きい場合もあることから、それら個々のデータから支保パターンを決定するためには検討の余地があると言える。これに対しては、同規模のトンネル径の速度一定区間で推力や

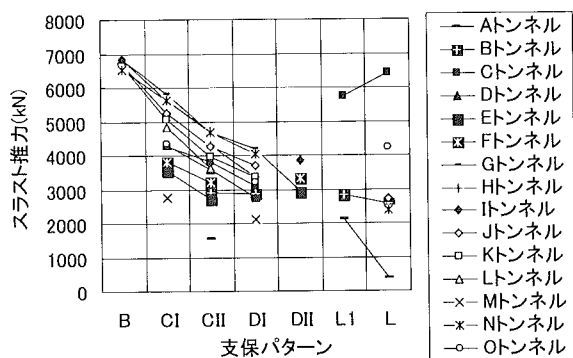
トルクを比較することが有効な手段とも考えられるが、このことは実際には非常に困難である。したがって、他の指標と組み合わせることやエネルギーに換算する等適切な処置が必要になる場合もあると考えられる。



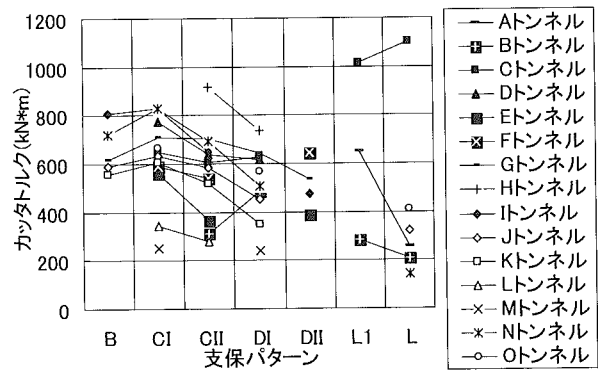
(a) 純掘進速度



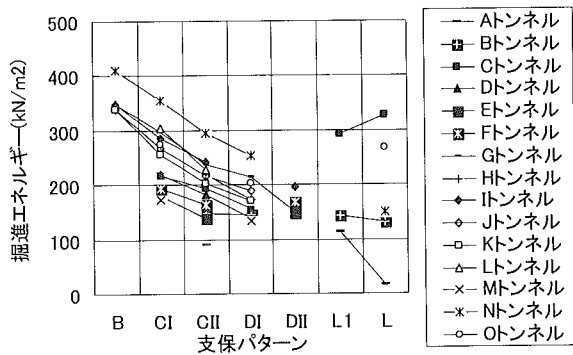
(b) カッタ回転速度



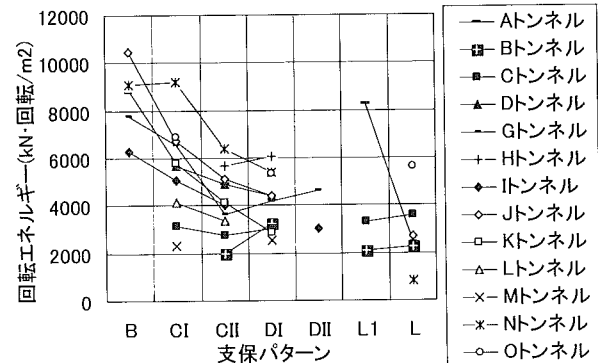
(c) スラスト推力



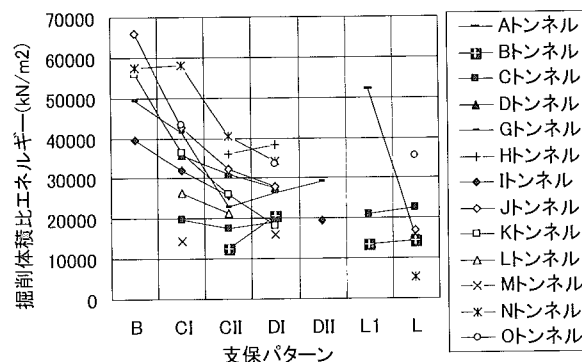
(d) カッタトルク



(e) 掘進エネルギー



(f) 回転エネルギー



(g) 掘削体積比エネルギー

図 3.2.8 平均的な機械データと支保パターン

3. 2. 2 各岩種における機械データと支保パターンとの関係

(1) 岩種毎の各トンネルの機械データと支保パターンとの関係

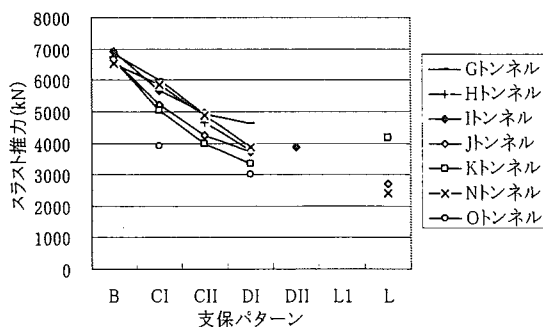
ここでは、機械データと支保パターンとの関係だけでなく、その支保パターンが設置された周辺の地山を構成する岩種についても考察する。岩種は、道路トンネル技術基準等の現行指針類³⁾を参考に表 3.2.1 に示すように各断面構成岩を硬質岩、中硬質岩、軟質岩と分類した。

表 3.2.1 岩種の分類

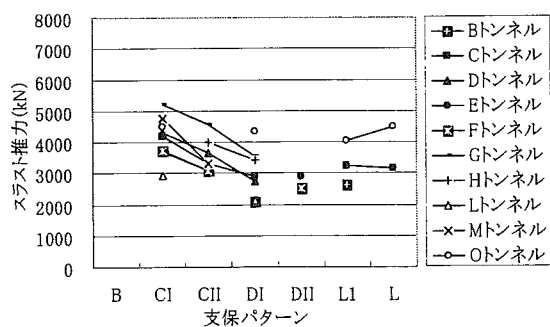
硬質岩	中硬質岩	軟質岩
斑れい岩 花崗岩 花崗閃緑岩 石英斑岩 ホルンフェルス 角閃石岩 砂岩、礫岩 (中古生層) 石灰岩 チャート 片麻岩 アブライト 輝緑岩	安山岩 玄武岩 石英安山岩 流紋岩 ひん岩 砂岩、礫岩 (第三紀層) 粘板岩 頁岩 (中古生層) 角礫岩	蛇紋岩 凝灰岩 凝灰角礫岩 千枚岩 黒色片岩 緑色片岩 泥岩、頁岩 (第三紀層) 砂岩泥岩互層

まず、各トンネルを同一のグラフに並べ、機械データと支保パターンとの関係を岩種毎に整理したものを示す。

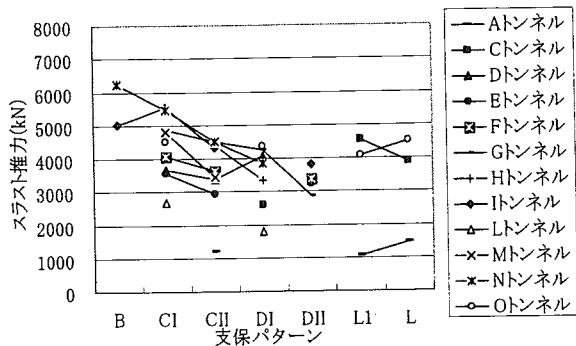
図 3.2.9 は、各トンネルのスラスト推力と支保パターンとの関係を岩種毎に整理したものである。これによると、岩種が軟質岩から硬質岩になり地質条件が良くなるにつれて、トンネル間の推力のばらつきが小さくなる傾向にあることが分かる。また、全ての岩種に対して、地質状態が悪く支保規模が大きくなるにつれて、スラスト推力が小さくなっていることが分かる。このことより前節で整理した平均的な機械データの整理における、トンネルごとのデータのばらつきの原因としては、軟質岩掘削中のデータが含まれることであると考えられる。このことより、岩種をも考慮したスラスト推力の分析により、採用すべき支保パターンがある程度、選定可能であると言える。すなわち、機械データの分析においては、機械データのダイレクト値だけでなく掘削岩種も重要なファクターであると考えられる。



(a) 硬質岩



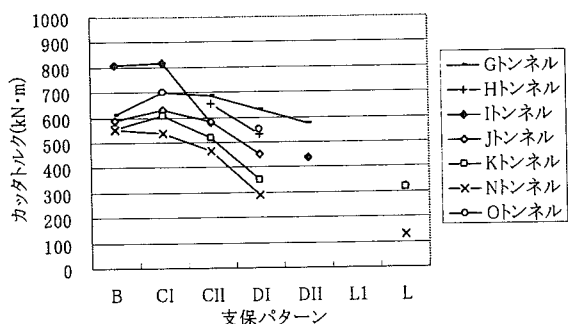
(b) 中硬質岩



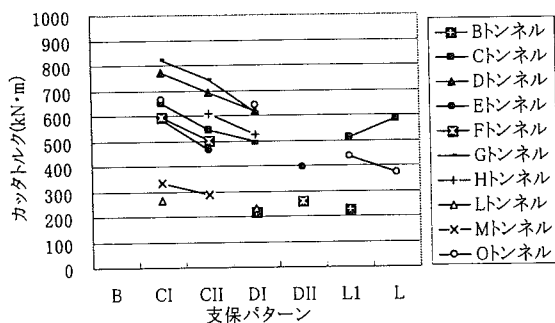
(c) 軟質岩

図 3.2.9 岩種毎に整理した各トンネルのスラスト推力と支保パターンの関係

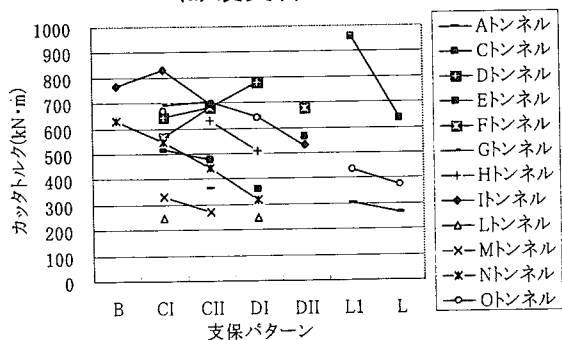
図 3.2.10 に、各トンネルのカッタートルクと支保パターンを岩種毎に整理したものを示す。これによると、岩種が軟質岩から硬質岩になり地質条件が良くなるにつれて、トンネル毎のばらつきが小さくなっていることは、図 3.2.9 のスラスト推力と同様である。また、地質状態が悪く支保規模が大きくなると、カッタートルクもスラスト推力と同様、小さくなっており、支保規模と機械データの相関が窺える。しかし、図 3.2.9 と図 3.2.10 を比較すれば、同じ岩種であっても前者のスラスト推力の方がトンネル間のばらつきが小さくなっていることが分かる。この原因としては、カッタートルクが節理や亀裂の方向といった地山状況だけでなく、カッターの個数・配置の影響を受けやすい指標であることが考えられる。このことにより、複数のトンネルについて同一の機械データ指標を用いて支保パターンを選定しようとする場合、カッタートルクよりスラスト推力の方が適していると言える。



(a) 硬質岩



(b) 中硬質岩



(c) 軟質岩

図 3.2.10 岩種毎に整理した各トンネルのカッタートルクと支保パターンの関係

(2) 個別のトンネルにおける機械データと支保パターンとの関係

ここでは、機械データを各トンネル個別に整理・分析した結果について述べる。

図 3.2.11 は各トンネルにおけるスラスト推力とカットトルクをプロットしたもののうち、特徴的なものの例である。プロットでは、それぞれの平均を中心とし、平均+標準偏差、平均-標準偏差を軸とした楕円で示した。これによると、図 3.2.11 のうち、(a) では、B から C I を除きカットトルクと推力が支保パターン別に線形関係にあるように認められる。対して、(b) では、推力については、ほぼ (a) と同様の幅で分布しているが、カットトルクについては密集して分布しているように認められる。逆に (c) では、推力が密集して分布しているように認められる。このように、個別のトンネルごとに見れば、支保パターン選定の指標としては、①推力が適するタイプ、②カットトルクが適するタイプ、③両者が適するタイプ等があることが分かる。今回対象としたデータにおいては③と考えられるものが大多数であったが、①、②、③どのタイプに分類できるか明確ではないもの、①、②と考えられるものもあった。したがって、ある一つのトンネルについて支保パターン選定のために機械データを用いる場合では、そのトンネルがこれら 3 つのタイプのどれに適合するかを施工の早期に判断する必要があることが分かる。

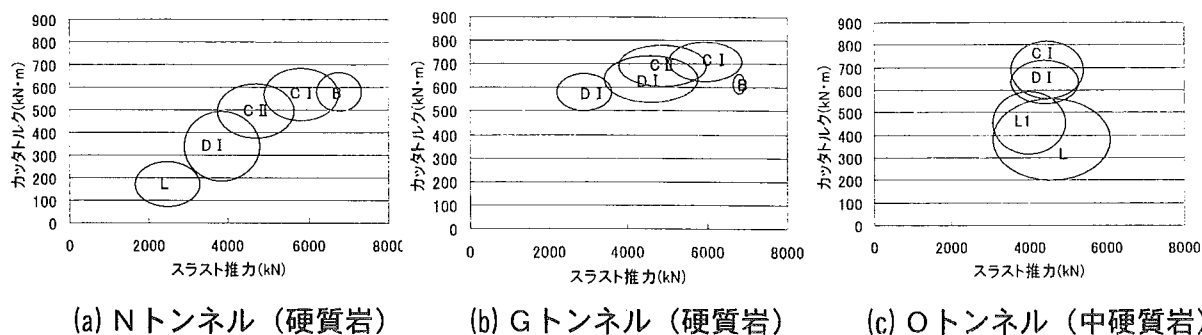


図 3.2.11 各トンネルにおけるカットトルクとスラスト推力の関係の例

(3) 機械データと TBM マシンタイプとの関係

ここでは、機械データをマシンタイプ毎で整理する。

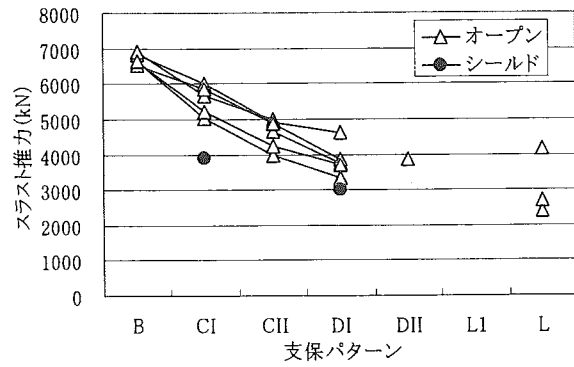
TBM は大きく分けて、オープンタイプとシールドタイプがある。各トンネルのマシンタイプは表 3.2.2 に示した通りであり、オープンタイプが 7 トンネル、シールドタイプが 8 トンネルとほぼ同数であった。

表 3.2.2 各トンネルのマシンタイプ

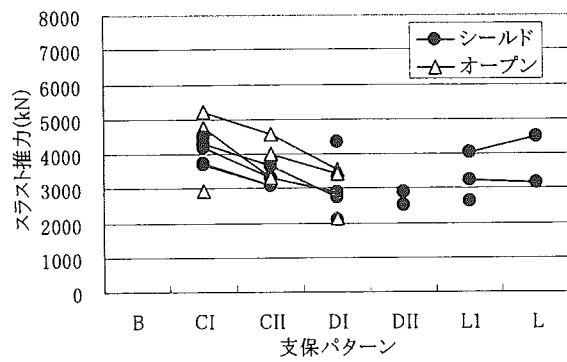
マシンタイプ	トンネル
シールド	A, B, C, D, E, F, O
オープン	G, H, I, J, K, L, M, N

検討結果としてスラスト推力とマシンタイプとの関係を図 3.2.12 にカットトルクとマシンタイプの関係を図 3.2.13 に示す。これによるとスラスト推力、カットトルクの双方ともオープンタイプは、硬質岩から軟質岩の広い岩種で用いられており、採用された支保パターンは、B から D II が中心であった。一方、シールドタイプについては、中硬質岩と軟質岩を中心に用いられ、採用された支保パターンは C I から L であった。また、両タイプが混在している岩

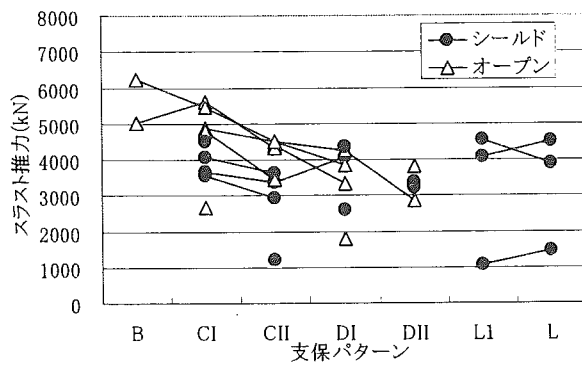
種、支保パターンについては、スラスト推力、カッタトルクの大きさとマシンタイプとの間に明確な関係は認められなかった。



(a) 硬質岩

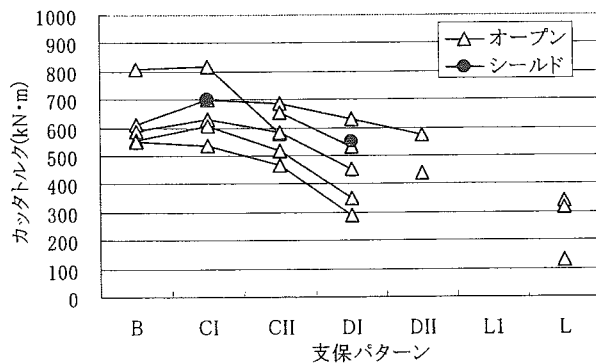


(b) 中硬質岩

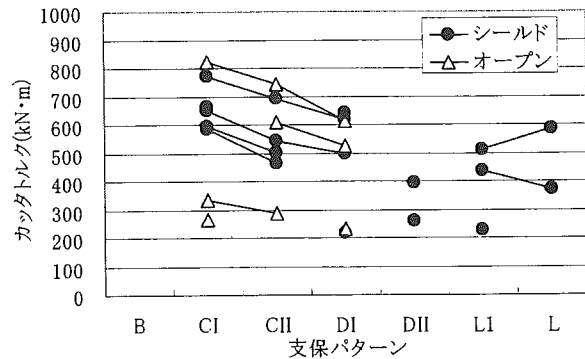


(c) 軟質岩

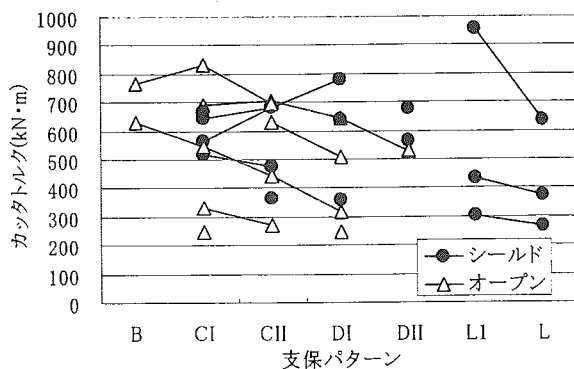
図 3.2.12 マシンタイプとスラスト推力の関係



(a) 硬質岩



(b) 中硬質岩



(c) 軟質岩

図 3.2.13 マシンタイプとカッタトルクの関係

(4) 全平均機械データと支保パターンの関係

これまでに述べてきたように、各トンネルおよびトンネル間において機械データはある支保パターンや岩種との相関関係があるものの、データにばらつきも有する。ここでは、各トンネルの機械データを横断的に検討し、支保パターンや岩種に対する機械データの傾向をより明確にするため、全てのトンネルの機械データについて平均したものを示す。したがって、ここでの分析はデータのばらつきを無視した分析であることに注意を要する。

図 3.2.14 に示すのは、スラスト推力、カットトルク、掘進エネルギー、回転エネルギー、掘削体積比エネルギーを全トンネルについて平均し、支保パターンおよび岩種ごとにプロットしたものである。

図 3.2.14 (a) によれば、支保規模が B、CⅠから L1、L と大きくなるにつれて、スラスト推力が小さくなっていることが分かる。また、この傾向は支保パターンが B から CⅡで特に顕著である。逆に、支保パターンが DⅠから L では、推力がほとんど一定に近づいていることが分かる。このことの原因としては、ある程度規模が大きな支保が採用されている地質状態が悪い地山においては、推力におけるカットヘッド推進反力以外の要因（摩擦抵抗や台車牽引力等）の占める割合が相対的に大きくなっている可能性も考えられ、今後機械データの吟味が必要である。

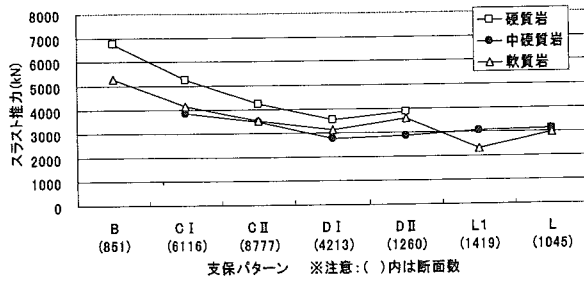
図 3.2.14 (b) によれば、カットトルクでは、特に中硬質岩、軟質岩について支保パターンとの相関があまり見られない。これは、図 3.2.9 と図 3.2.10 の比較で述べたように、トンネルごとのばらつき大きいことが一因であることが考えられる。このように、特に中硬質岩、軟質岩において、複数のトンネルに対して同一のカットトルク指標を用いて支保パターンを選定することは、地山評価を誤る可能性が高いものと言える。

推力を断面積で除したものである掘進エネルギー（図 3.2.14 (c) 参照）については、スラスト推力とほぼ同様の傾向となっている。これは、今回の検討対象トンネルの掘削径が 3.5 から 5m 程度とほぼ同程度であったことが原因であると考えられる。今後、大断面 TBM の機械データが蓄積されれば、新たな考察を行う必要があると考えられる。

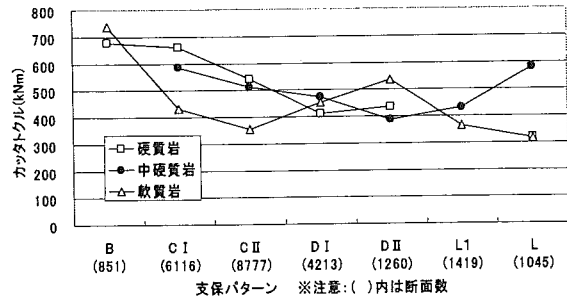
回転エネルギー（図 3.2.14 (d) 参照）については、支保規模との相関が特に硬質岩、中硬質岩についてよく見られ、特に支保パターン B から CⅡが顕著である。回転エネルギーは、カットトルクおよび速度、掘削断面積から求められるものである。カットトルクが支保規模との相関が見られなかったのに対して、回転エネルギーには相関がある程度見られたことから、カットトルクについては、速度と総合して判断する必要性が窺える結果と言える。

掘削体積比エネルギー（図 3.2.14 (e) 参照）については、回転エネルギーと同様となっている。これは掘削体積比エネルギーに対する回転エネルギーの項が大きく、推進エネルギーの要因が相対的に小さくなっていることによる。

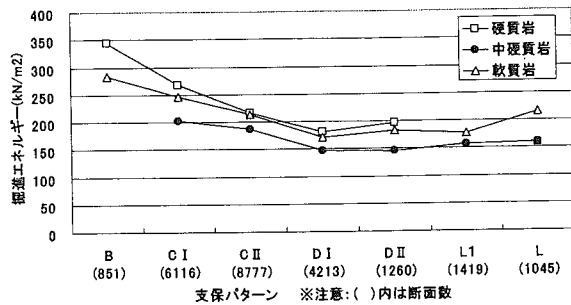
また、全機械データを総じて見れば、支保規模と機械データの相関について、硬質岩が他の岩種より際立っている。このように、機械データの分析においては掘削岩種も重要なファクターであり、機械データのダイレクト値だけでなく、掘削中の岩種を掘削ずり等から評価するシステムを確立することも重要であると言える。



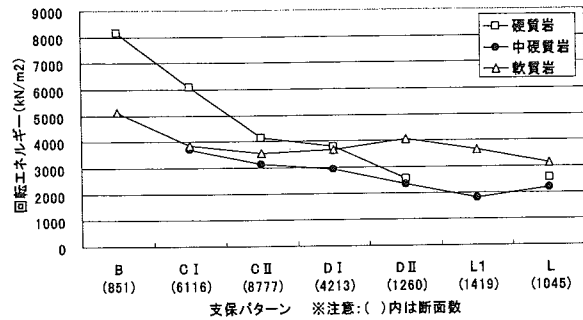
(a) スラスト推力



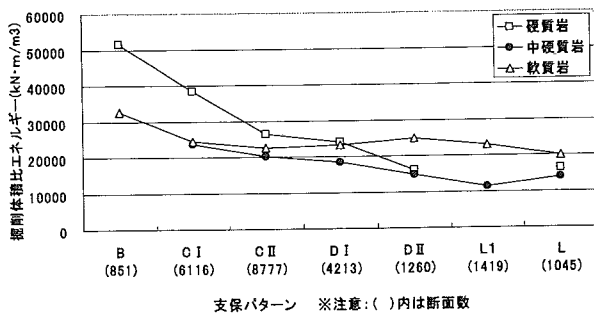
(b) カッタトルク



(c) 掘進エネルギー



(d) 回転エネルギー



(e) 掘削体積比エネルギー

図 3.2.14 全平均機械データと岩種、支保パターンの関係

3.2.3 機械データと補助工法採用実績との関係

TBM トンネルにおいては、断層、破碎帯、高地下水、膨張性などの不良地山において、掘進停止等のトラブルの徴候が見られる場合が多い。そのような時、掘進停止等のトラブル回避の手段として何らかの補助工法を用いるが一般的である。もし、補助工法採用が遅れたり不十分であったりしてトラブルを回避できず掘進不可能となれば、TBM の最大の長所である高速施工が実現できず、工費増大につながることも考えられる。したがって、トラブルの原因となり得るような不良地山部の適切な把握や補助工法の適切な採用は、TBM 施工において極めて重要である。

ここでは、前節までに整理してきた各トンネルの機械データと補助工法採用箇所との相関について整理し、補助工法採用箇所の機械データがどのように変化していたかを検討する。本検討で整理した採用補助工法実績を表 3.2.3, また補助工法の概要図の一部を図 3.2.15 に示す。

表 3.2.3 補助工法の採用実績

トンネル	採用された主な補助工法
B	ウレタン注入, 吹付けモルタル, 鏡補強工 等
I	吹付けモルタル, 鏡止めボルト, セメント注入, フォアパイリング等
K	空洞充填工, フォアパイリング等

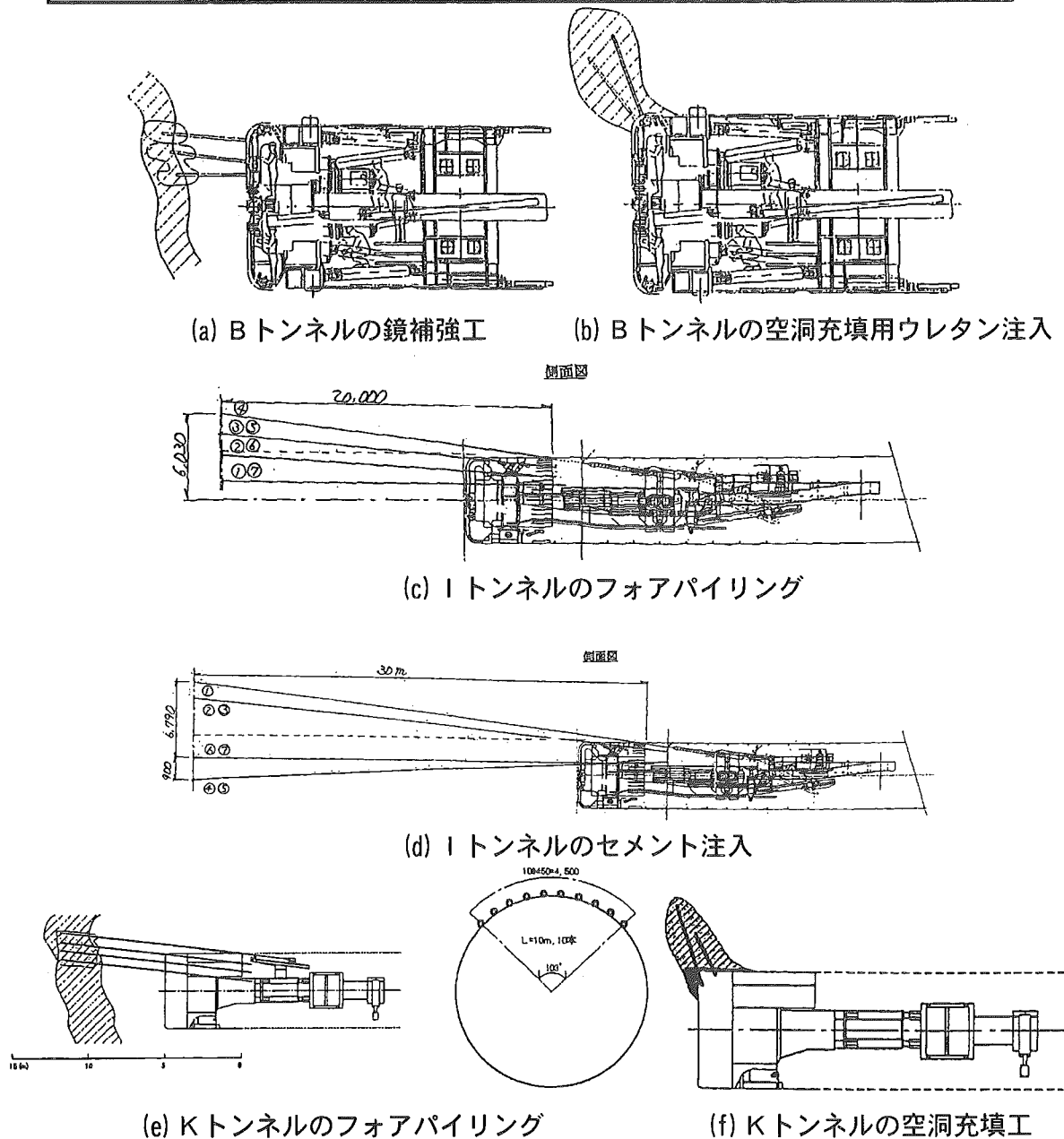
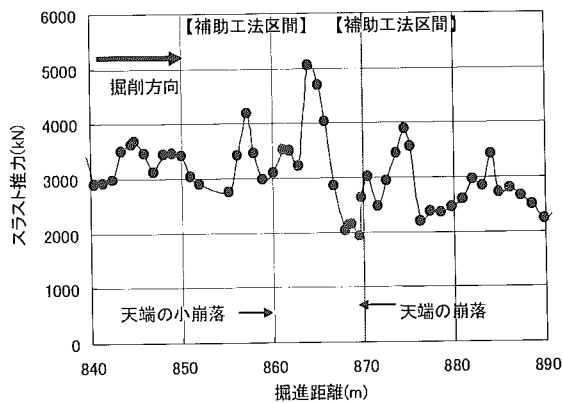


図 3.2.15 補助工法の概要図

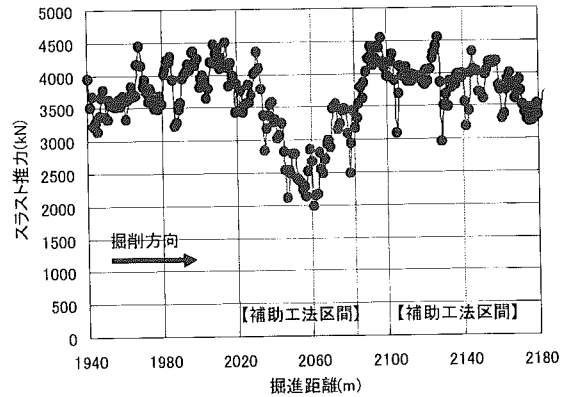
図 3.2.16 にスラスト推力と補助工法採用箇所の関係, 図 3.2.17 にカッタートルクと補助工法採用箇所を示す。これによると, 不良地山部において崩落等が発生し, 補助工法を採用した箇所においては, その箇所の前後の区間よりもスラスト推力, カッタートルクの機械データが低下する場合が多いことが分かる。また, このことは, 機械データの分析が不良地山部の早期発見・早期対策に役立つ可能性を示唆している。

ただし, B トンネルの小規模な崩落が発生した箇所ではスラスト推力の低下が見られないことや K トンネルの補助工法が採用していない掘進距離 820m 付近でカッタートルクが低下している等,

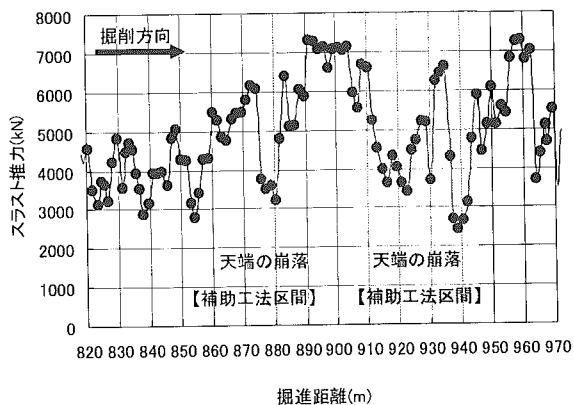
機械データ低下そのものが全て補助工法を採用すべき地山であることを表しているとは言えない場合もあり、前方探査結果と総合して判断するなど注意が必要である。



(a) Bトンネル

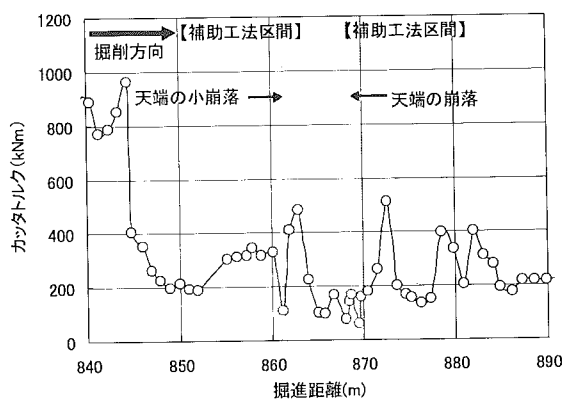


(b) Iトンネル

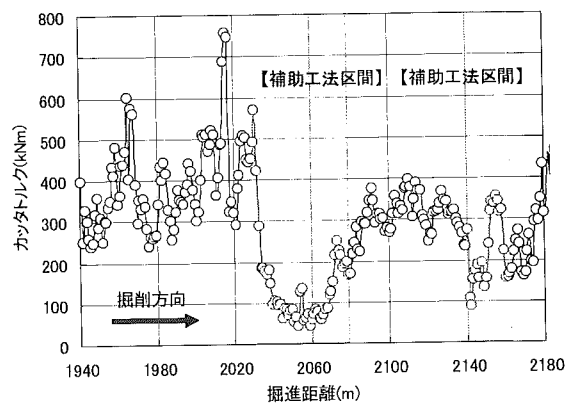


(c) Kトンネル

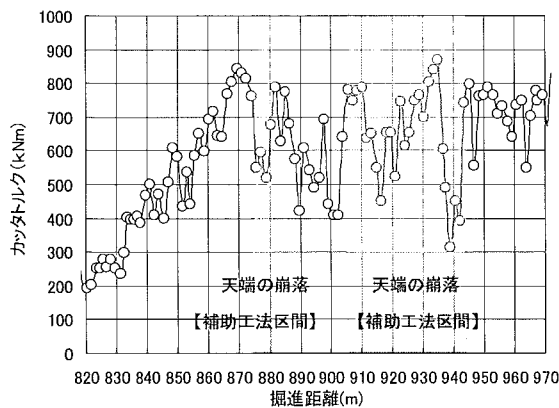
図 3.2.16 スラスト推力と補助工法採用実績の関係



(a) Bトンネル



(b) Iトンネル



(c) Kトンネル

図 3.2.17 カッタートルクと補助工法採用実績の関係

3.3 機械データの分析結果のまとめ

本章では、TBM トンネル施工中に得られた機械データと採用された支保パターンおよびその時の周辺地山の岩種との関係について分析を行った。それにより以下の知見が得られた。

- ①各トンネル個別に見れば、機械データと支保パターンが単純な相関関係にあるとは必ずしも言えない。しかし、機械データやトンネルによっては、機械データと支保パターンがかなり良好な相関関係にあり、機械データによって採用すべき支保規模を設定できる可能性が高いことが分かった。また、トンネルを個別に分類した場合、支保パターンと機械データの関係は、スラスト推力との関係が明確なもの、カッタートルクとの関係が明確なものもあるが、大部分が両者との関係が明確なものであった。ただし、そのうち、どのタイプであるかは、支保選定指標を選択するという観点から慎重に各トンネル個別に判断する必要がある。
- ②機械データの指標には支保パターンの関連性が見受けられる指標があるが、ほぼ同等の支保規模であってもトンネル間でのばらつきが大きい場合もある。
- ③各トンネルを同一のグラフに並べ機械データと支保パターンとの関係を見た場合、カッタートルクよりスラスト推力が、軟質岩より硬質岩がトンネル間の機械データのばらつきが小さい。
- ④TBM マシンタイプについては、オープンタイプは、幅広い岩種で用いられ、採用された支保パターンは、B から D II が中心であった。一方、シールドタイプについては、中硬質岩と軟質岩が中心であり、採用された支保パターンは C I から L であった。また、スラスト推力およびカッタートルクなどの機械データの値としては、マシンタイプ毎での大小関係に明確な差は認められなかった。
- ⑤岩種で区別して全トンネルを平均的に見た場合、硬質岩の全支保パターンと中硬質岩・軟質岩の支保パターン B から C II については、機械データを支保パターンの選定に用いることが、ある程度可能となる可能性が高い。また、機械データの中では、スラスト推力または、各種エネルギー（掘進、回転、掘削体積比）が支保パターンの選定指標として適している場合が多い。
- ⑥補助工法を採用する必要があるような不良地山部においては、機械データに何らかの変化が生じる可能性が高い。

4. 支保に作用する荷重の解析

4.1 対象断面

ここでは、支保に作用する荷重を解析する断面について述べる。これらの断面では、計測断面として設定され、各断面における支保工にひずみゲージが貼付してある。これにより、荷重作用下で支保工に発生しているひずみが測定でき、支保工の断面力が算定できる。ここでは、これらの計測断面における支保工、周辺地質および解析に必要な支保工緒元や地山物性値について整理する。

表 4.1.1 には、解析対象とする断面の共通支保パターンおよび岩種を示す。なお、支保パターン B や C I では、無支保あるいは吹付けコンクリートのみであるため、ひずみ測定が困難である。したがって、計測用の支保工を設置している。

表 4.1.1 解析断面の概要

トンネル・No.	支保 パターン	岩種	トンネル・No.	支保 パターン	岩種
Aトンネル(1)	C II	凝灰岩	Gトンネル(7)	D II	チャート
Aトンネル(2)	C II	流紋岩	Gトンネル(8)	D I	千板岩
Aトンネル(3)	C II	流紋岩	Hトンネル(1)	D I	粘板岩
Aトンネル(4)	L	流紋岩	Hトンネル(2)	D I	チャート
Aトンネル(5)	L	流紋岩	Hトンネル(3)	C II	斑れい岩
Bトンネル(1)	L I	安山岩	Hトンネル(4)	C II	粘板岩
Bトンネル(2)	L I	安山岩	Hトンネル(5)	D I	千板岩
Cトンネル(1)	L I	安山岩	Hトンネル(6)	D I	千板岩
Cトンネル(2)	L I	安山岩	Hトンネル(7)	D I	チャート
Eトンネル(1)	D II	砂岩泥岩互層	Hトンネル(8)	D I	千板岩
Fトンネル(1)	C II	砂岩泥岩互層	Hトンネル(9)	D I	千板岩
Fトンネル(2)	D II	砂岩	Nトンネル(1)	D I	凝灰岩
Fトンネル(3)	C II	砂岩	Nトンネル(2)	C II	凝灰岩
Gトンネル(1)	D I	粘板岩	Nトンネル(3)	C I	凝灰岩
Gトンネル(2)	D II	粘板岩	Nトンネル(4)	B	凝灰岩
Gトンネル(3)	D II	凝灰岩	Nトンネル(5)	L	花崗斑岩
Gトンネル(4)	D I	凝灰岩	Nトンネル(6)	D I	花崗斑岩
Gトンネル(5)	C II	凝灰岩	Oトンネル(1)	L I	流紋岩
Gトンネル(6)	C II	千板岩	Oトンネル(2)	L I	流紋岩

本検討では、後述するように骨組み構造解析（フレーム解析）を行う。この方法では対象構造物（ここではTBMトンネルの支保工）を梁、地盤をばねでモデル化する。すなわち、対象構造物の形状に加えて、解析に用いる物性値としては、梁の弾性係数と曲げモーメント、断面積、地盤ばね定数（地盤反力係数を計算奥行きに換算したもの）である。

ここでは、各断面における解析を整理し、表 4.1.2 から表 4.1.8 に示す。なお、各断面における地盤の弾性係数については、それを求める試験が行われていないことから、各断面の一軸圧縮強度と、文献からの一軸圧縮試験と弾性係数の関係⁴⁾により求めた。

表 4.1.2 各解析断面の条件 (その1)

トンネル・No	A (1)	A (2)	A (3)	A (4)	A (5)	B (1)
支保外径(m)	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	5.0
共通支保パターン	C II	C II	C II	L	L	L I
支保間隔(m)	1.25	1.5	1.5	1.0	1.0	1.0
支保弾性係数(kN/m ²)	2.1×10^8	2.1×10^8	2.1×10^8	2.1×10^8	2.1×10^8	2.1×10^8
支保断面二次モーメント(cm ⁴)/m	302	252	252	485.2	485.2	909
支保断面積(cm ²)/m	17.27	14.39	14.39	50.0	50.0	36.0
吹付けコンクリート厚さ(cm)	(木矢板)	(木矢板)	(木矢板)	(セグメント)	(セグメント)	(ライク)
吹付けコンクリート打設角度(°)	-	-	-	-	-	
地盤単位体積重量(kN/m ³)	22	20	20	20	20	27
地盤変形係数(MN/m ²)	7340	2600	2600	2600	63	2600
地盤反力係数(MN/m ³)	4051	1430	1430	1430	10	1430

表 4.1.3 各解析断面の条件 (その2)

トンネル・No	B (2)	C (1)	C (2)	E (1)	F (1)	F (2)
支保外径(m)	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
共通支保パターン	L I	L I	L I	D II	C II	D II
支保間隔(m)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
支保弾性係数(kN/m ²)	2.1×10^8	2.1×10^8	2.1×10^8	2.1×10^8	2.1×10^8	2.1×10^8
支保断面二次モーメント(cm ⁴)/m	909	909	909	839	378	839
支保断面積(cm ²)/m	36.0	36.0	36.0	30.0	21.59	30.0
吹付けコンクリート厚さ(cm)	(ライク)	(ライク)	(ライク)	3	2	3
吹付けコンクリート打設角度(°)	-	-	-	180	180	180
地盤単位体積重量(kN/m ³)	27	27	27	24	24	24
地盤変形係数(MN/m ²)	604	932	604	4870	1950	1550
地盤反力係数(MN/m ³)	244	377	244	1970	790	630

表 4.1.4 各解析断面の条件 (その3)

トンネル・No	F (3)	G (1)	G (2)	G (3)	G (4)	G (5)
支保外径(m)	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
共通支保パターン	C II	D I	D II	D II	D I	C II
支保間隔(m)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.5
支保弾性係数(kN/m ²)	2.1×10^8	2.1×10^8	2.1×10^8	2.1×10^8	2.1×10^8	2.1×10^8
支保断面二次モーメント(cm ⁴)/m	378	383	839	839	383	255
支保断面積(cm ²)/m	21.59	21.9	30.0	30.0	21.9	14.6
吹付けコンクリート厚さ(cm)	2	3	3	3	3	2
吹付けコンクリート打設角度(°)	180	120	120	120	120	120
地盤単位体積重量(kN/m ³)	24	27	27	27	27	27
地盤変形係数(MN/m ²)	8960	988	13280	13280	1715	24400
地盤反力係数(MN/m ³)	3620	399	5370	5370	693	9860

表 4.1.5 各解析断面の条件 (その4)

トンネル・No	G (6)	G (7)	G (8)	H (1)	H (2)	H (3)
支保外径(m)	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
共通支保パターン	C II	D II	D I	D I	D I	C II
支保間隔(m)	1.5	1.0	1.0	1.0	1.0	1.5
支保弾性係数(kN/m ²)	2.1×10^8	2.1×10^8	2.1×10^8	2.1×10^8	2.1×10^8	2.1×10^8
支保断面二次モーメント(cm ⁴)/m	255	839	383	387	378	252
支保断面積(cm ²)/m	14.6	30.0	21.9	21.59	21.59	14.39
吹付けコンクリート厚さ(cm)	2	3	3	3	3	2
吹付けコンクリート打設角度(°)	120	120	120	120	120	120
地盤単位体積重量(kN/m ³)	27	27	27	27	27	28
地盤変形係数(MN/m ²)	24400	24400	24400	12397	12397	12152
地盤反力係数(MN/m ³)	9860	9860	9860	5010	5010	4911

表 4.1.6 各解析断面の条件 (その5)

トンネル・No	H (4)	H (5)	H (6)	H (7)	H (8)	H (9)
支保外径(m)	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
共通支保パターン	C II	D I	D I	D I	D I	D I
支保間隔(m)	1.5	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
支保弾性係数(kN/m ²)	2.1×10^8	2.1×10^8	2.1×10^8	2.1×10^8	2.1×10^8	2.1×10^8
支保断面二次モーメント(cm ⁴)/m	252	378	378	378	378	378
支保断面積(cm ²)/m	14.39	21.59	21.59	21.59	21.59	21.59
吹付けコンクリート厚さ(cm)	2	3	3	3	3	3
吹付けコンクリート打設角度(°)	120	120	120	120	120	120
地盤単位体積重量(kN/m ³)	27	28	28	28	27	27
地盤変形係数(MN/m ²)	14033	20178	20178	12152	10682	10682
地盤反力係数(MN/m ³)	5671	8153	8153	4911	4317	4317

表 4.1.7 各解析断面の条件 (その6)

トンネル・No	N (1)	N (2)	N (3)	N (4)	N (5)	N (6)
支保外径(m)	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
共通支保パターン	D I	C II	C I	B	L	D I
支保間隔(m)	1.0	1.5	吹付けのみ	無支保	0.75	1.0
支保弾性係数(kN/m ²)	2.1×10^8	2.1×10^8	2.1×10^8	2.1×10^8	2.1×10^8	2.1×10^8
支保断面二次モーメント(cm ⁴)/m	378	252	378	378	378	378
支保断面積(cm ²)/m	21.59	14.39	21.59	21.59	21.59	21.59
吹付けコンクリート厚さ(cm)	3	2	2	2	(セグメント)	3
吹付けコンクリート打設角度(°)	260	260	260	260	-	260
地盤単位体積重量(kN/m ³)	26	26	26	26	26	26
地盤変形係数(MN/m ²)	24990	32144	50078	35084	17070	21560
地盤反力係数(MN/m ³)	10930	14060	21900	15340	7465	9430

表 4.1.8 各解析断面の条件 (その7)

トンネル・No	○ (1)	○ (2)				
支保外径(m)	4.5	4.5				
共通支保パターン	D I	L 1				
支保間隔(m)	0.75	0.75				
支保弾性係数(kN/m ²)	2.1×10^8	2.1×10^8				
支保断面二次モーメント(cm ⁴)/m	288	288				
吹付けコンクリート厚さ(cm)	(うけ)	(うけ)				
吹付けコンクリート打設角度(°)	-	-				
支保断面積(cm ²)/m	30.0	30.0				
地盤単位体積重量(kN/m ³)	26	26				
地盤変形係数(MN/m ²)	9845	9845				
地盤反力係数(MN/m ³)	4310	4310				

4.2 計測データの整理

計測データとしては、図 4.2.1 に示すように支保工に貼付されたひずみゲージからひずみを測定し、それを断面力（曲げモーメント M 、軸力 N ）に換算して用いている。

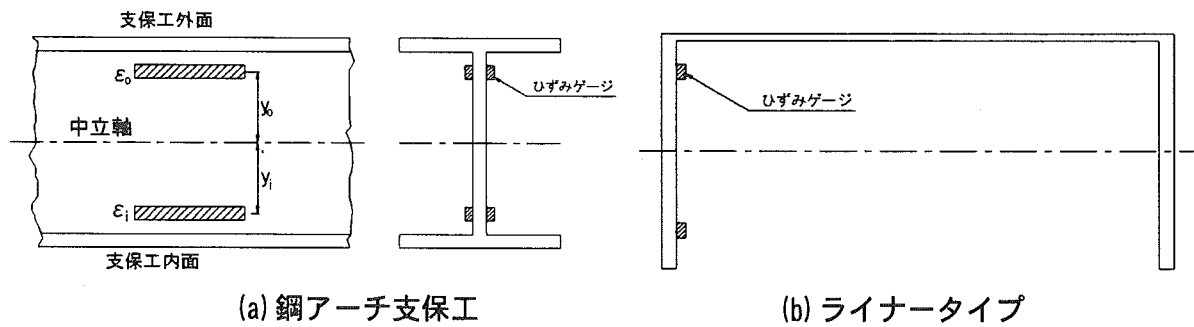


図 4.2.1 支保工ひずみ測定概要図

なお、図 4.2.1 のように中立軸から y_0 、 y_i 離れたひずみゲージによるひずみ測定値 ε_0 、 ε_i より断面力は、式 (4.2.1) によって算定される（なお、式 (4.2.1) は多くのトンネルがそうであったように、 $y_i=y_0$ として展開した）。

$$M = \frac{\varepsilon_i - \varepsilon_0}{y_i + y_0} EI \quad \dots \text{式 (4.2.1)}$$

$$N = \frac{\varepsilon_0 y_i + \varepsilon_i y_0}{y_0 + y_i} EA = \frac{\varepsilon_0 + \varepsilon_i}{2} EA$$

ただし、 E ：鋼アーチ支保工の弾性係数

I ：鋼アーチ支保工の断面二次モーメント

A ：鋼アーチ支保工の断面積

である。

また、Aトンネルでは、計測データが曲げ応力 σ_M 、軸応力 σ_N として整理されていた。

そこで、断面力を式 (4.2.2) により算定した。

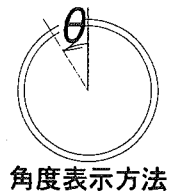
$$M = \frac{I}{y_i} \sigma_M \dots \text{式 (4.2.2)}$$

$$N = A \sigma_N$$

各トンネルの計測位置は、天端からの角度で表 4.2.1 に示す。このように各計測断面において、3 箇所から 7 箇所の場所で断面力を計測している。

表 4.2.1 各トンネルの計測位置（角度）

計測 No.	1 (A)	2 (B)	3 (C)	4 (D)	5 (E)	6 (F)	7 (G)
A トンネル	0	150	90	45	—	—	—
B トンネル	90	270	0	—	—	—	—
C トンネル	90	270	0	—	—	—	—
E トンネル	0	90	270	—	—	—	—
F トンネル	0	90	180	270	—	—	—
G トンネル	0	45	315	90	270	135	225
H トンネル	0	45	315	90	270	135	225
N トンネル	0	45	315	45	270	135	225
O トンネル	120	60	40	0	320	280	240



支保工のひずみは支保工設置後、その時のひずみを 0 として直ちに計測が開始される。したがって、ひずみには支保工の自重が含まれていないことに注意を要する。なお、本検討で用いるひずみは、設置後十分期間をおいて収束したものをを用いる。図 4.2.2 から図 4.2.39 に各トンネルの（ひずみから算出した）断面力の時系列の変化をプロットしたものを示す。これによると、支保工の設置後、しばらくは断面力が大きく変動している。これは、TBM 掘削および TBM マシン推進等の施工時の影響が断面力に大きく変動をもたらしたものと考えられる。この施工時の一時的な影響が支保工断面力に与える影響は、施工管理上重要であると考えられるが、本検討ではそれらについては今後の検討課題と位置づける。本検討で用いる断面力は、一時的な施工時の影響が無くなり、収束したもの、すなわち矢印で示したものである。この収束値としての断面力は、設計上の長期的な支保工の安定に極めて重要であり、避難坑はもとより今後の本坑での TBM 活用のためには特に重要であると考えられる。

ただし、他のトンネルが計測開始からの時系列に整理されているのに対し、A トンネルについてはのみは、TBM 支保工計測断面と接近してくる本坑拡幅断面切羽との位置関係で計測が整理されている。したがって、A トンネル計測の最後には本坑拡幅の影響が含まれデータが大きく変動している。そこで本研究では、本坑拡幅施工の影響が TBM 支保工計測断面に及ばないと考えられる、本坑断面切羽が TBM 支保工計測断面手前 50m の時のデータを用いることとする。

図 4.2.2 から図 4.2.39 に、各計測断面における支保工計測結果を示す。それぞれの時系列データのうち矢印で示した計測データが解析に用いたデータである。なお、ここで軸力は、引張を正として表示している。

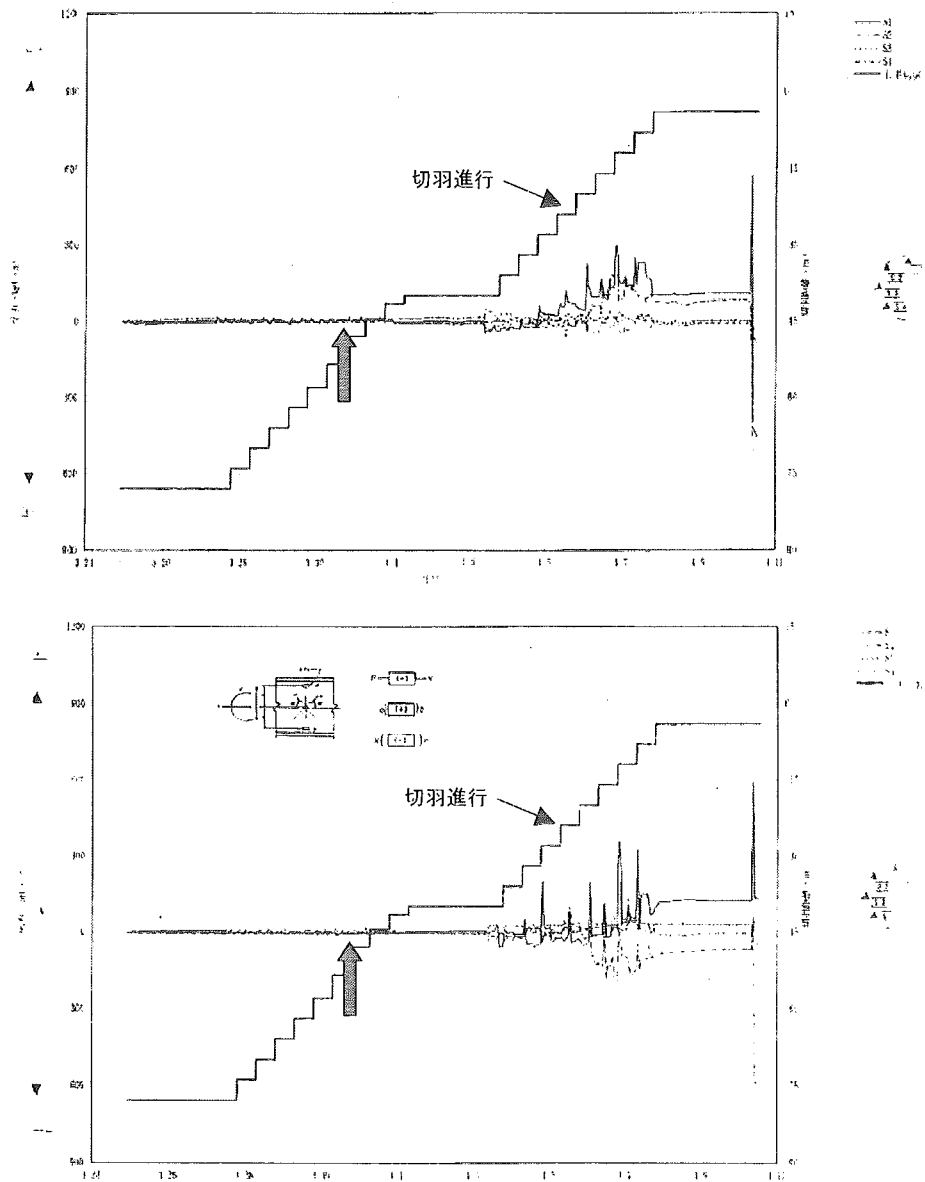


図 4.2.2 Aトンネル (1) の鋼アーチ支保工計測結果



-67-



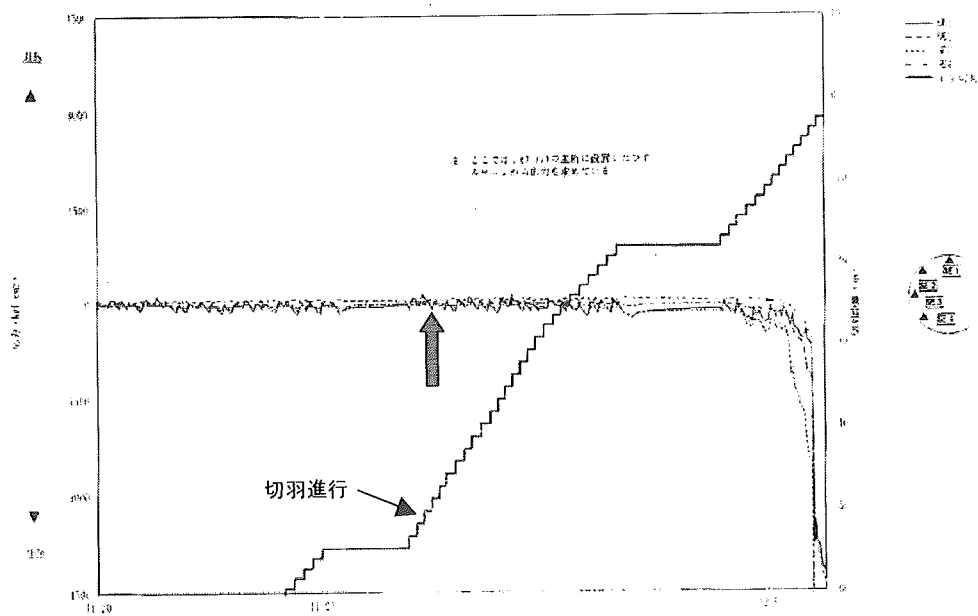
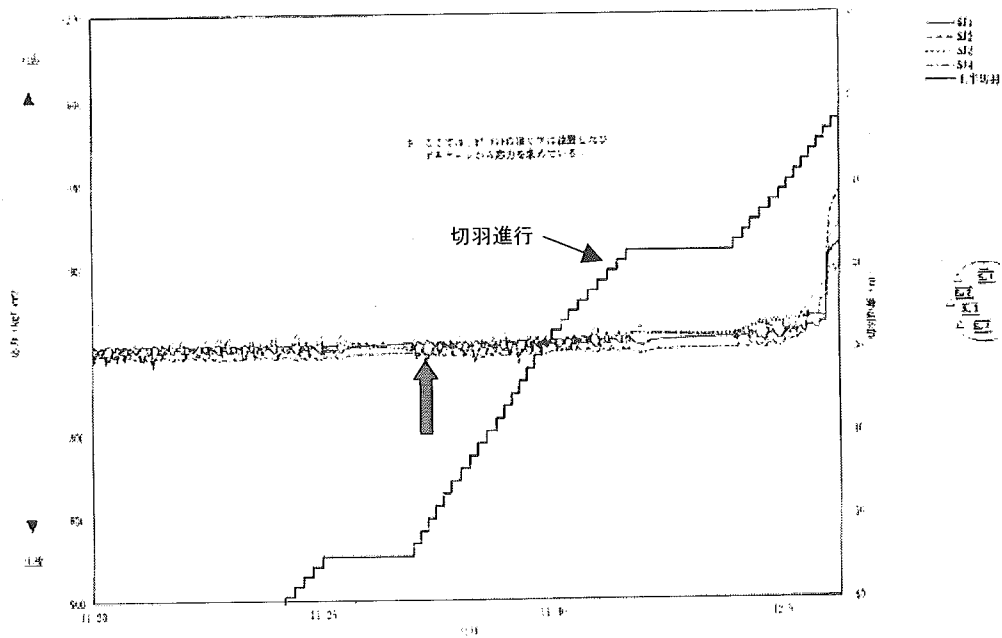


図 4.2.5 Aトンネル（4）の鋼製セグメント計測結果

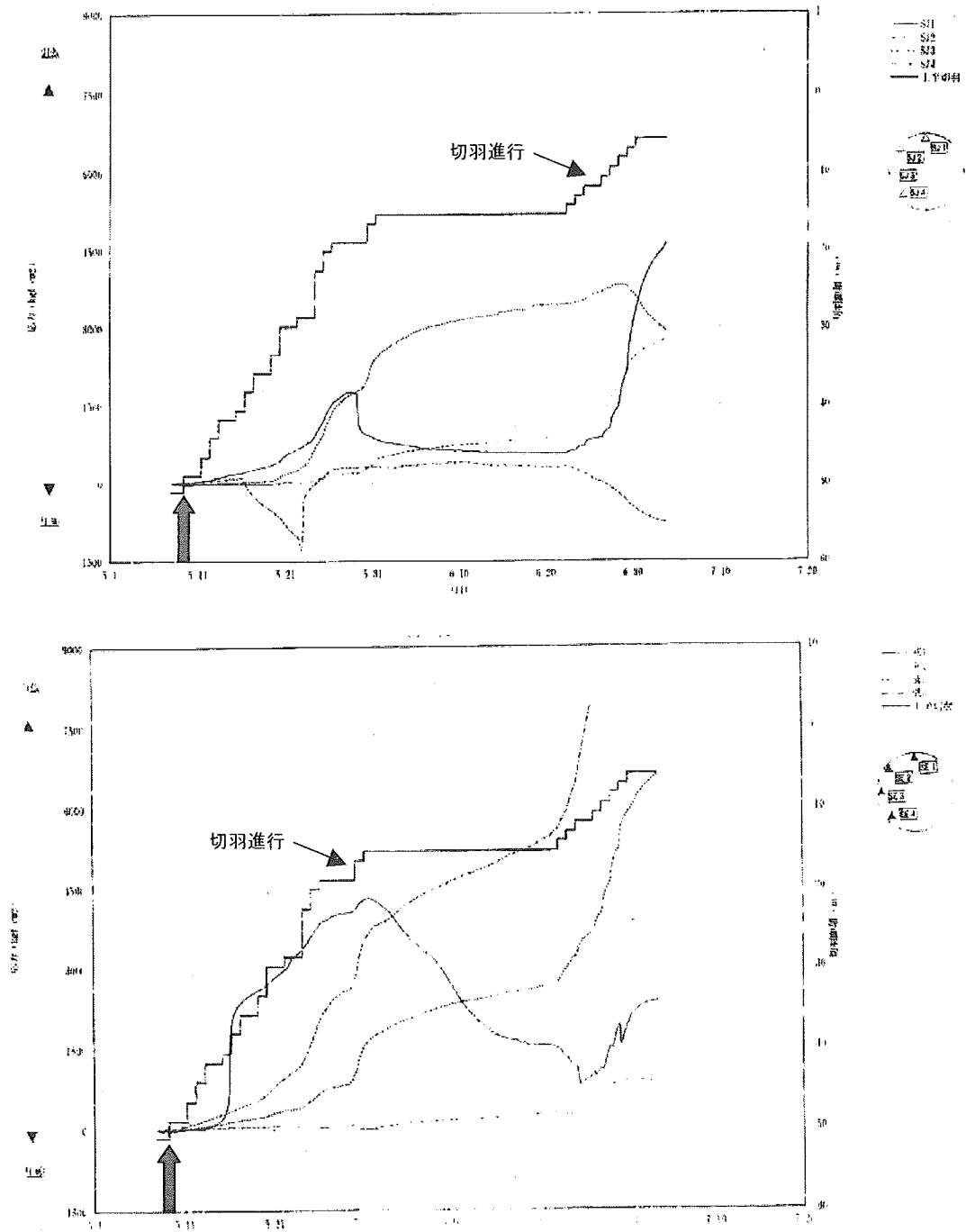


図 4.2.6 Aトンネル（5）の鋼製セグメント計測結果

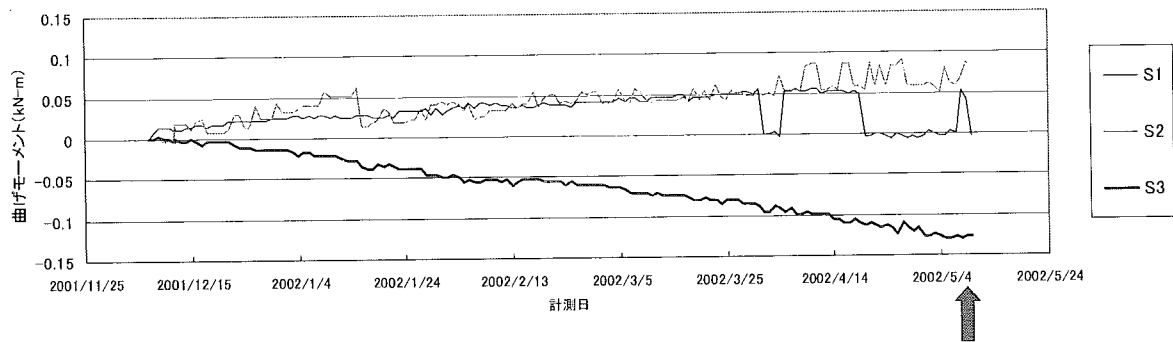
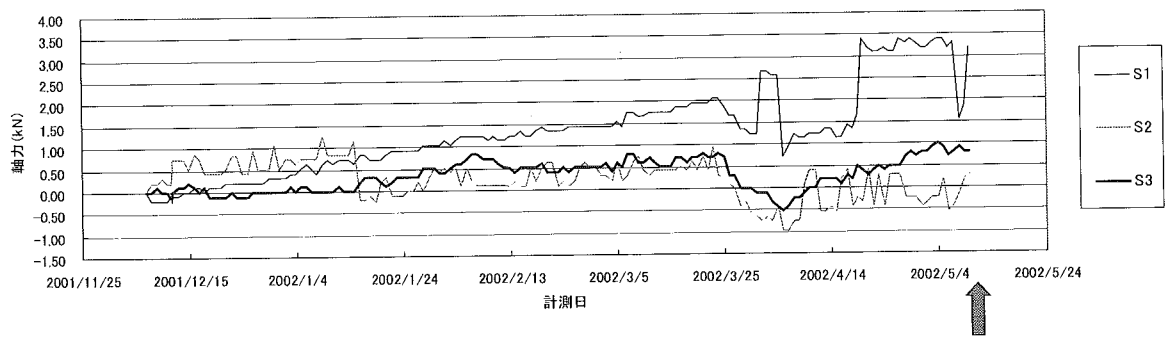


図 4.2.7 Bトンネル（１）の簡易ライナー計測結果

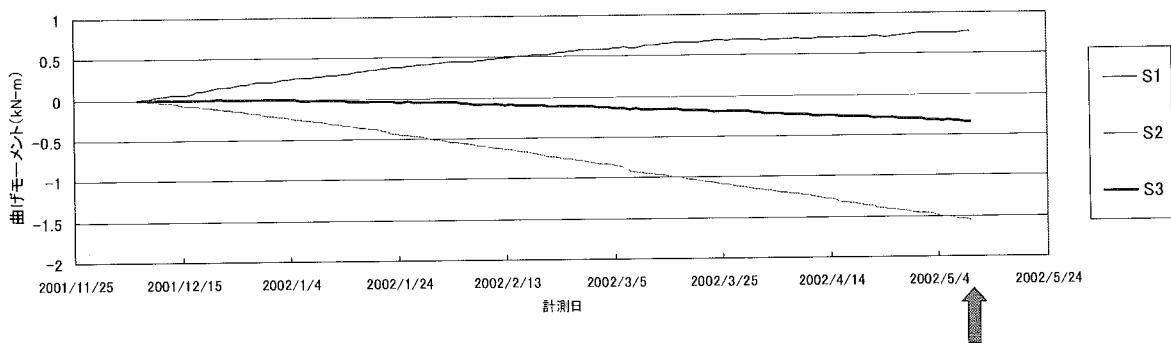
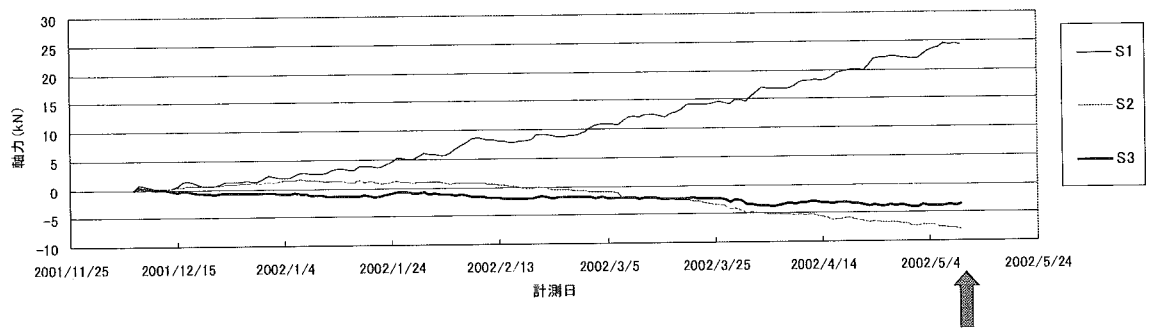


図 4.2.8 Bトンネル（２）の簡易ライナー計測結果

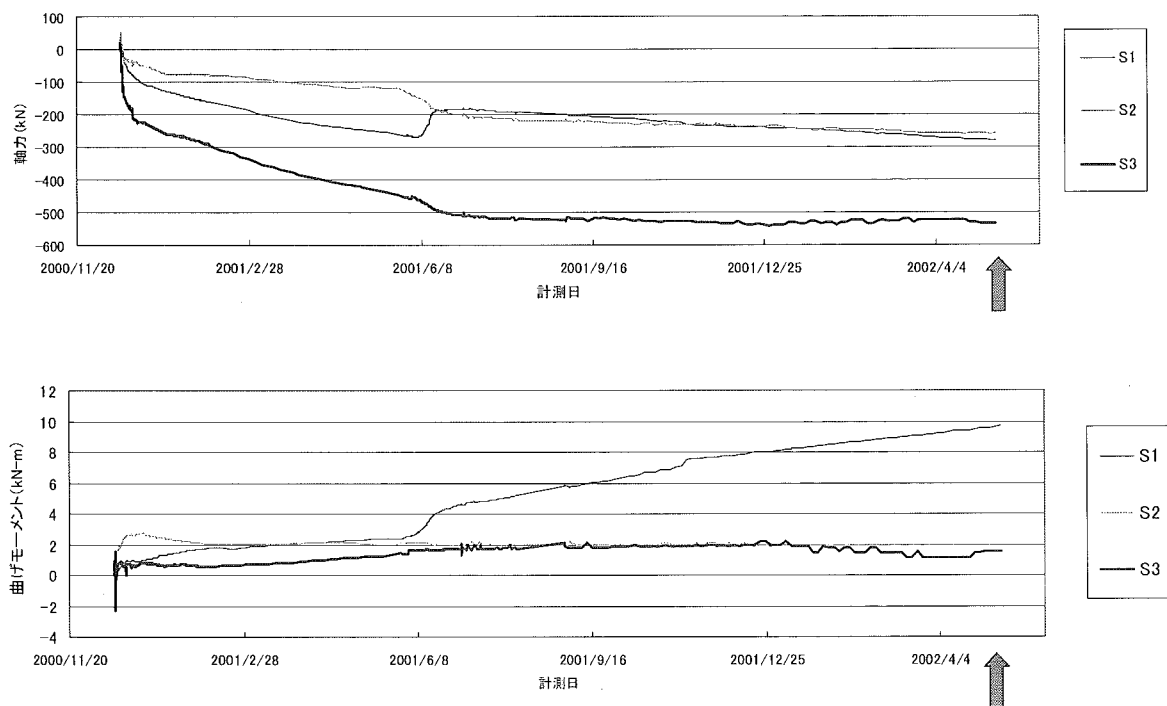


図 4.2.9 Cトンネル（１）の簡易ライナー計測結果

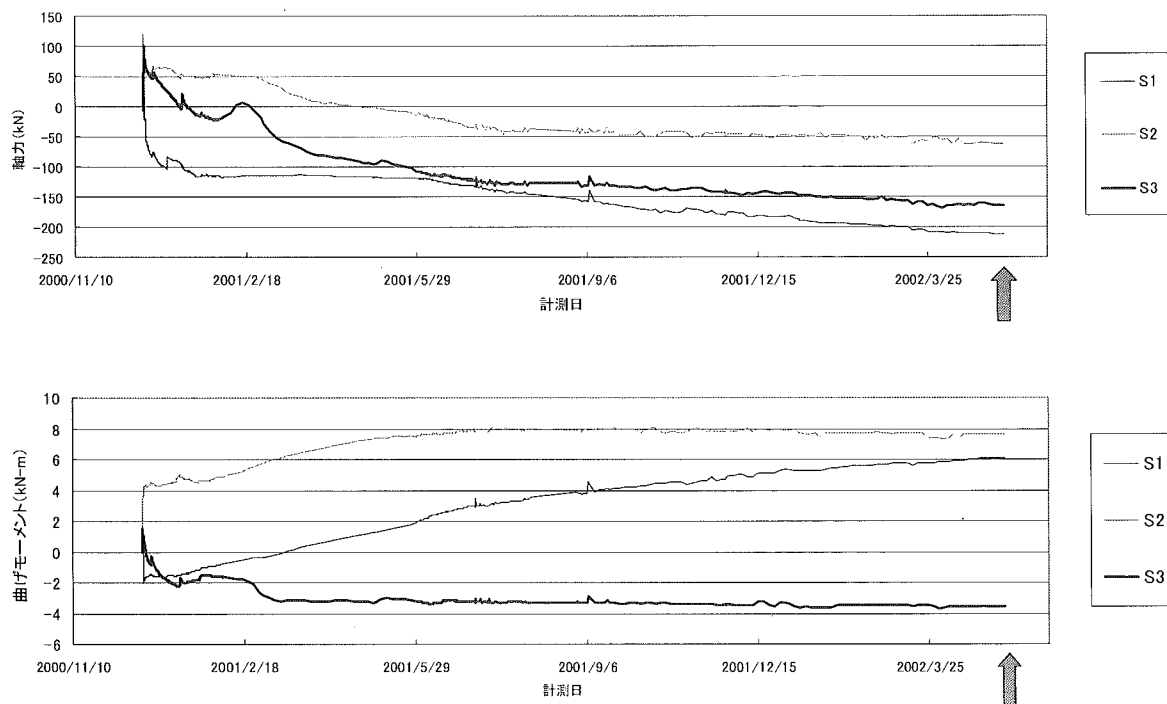


図 4.2.10 Cトンネル（２）の簡易ライナー計測結果

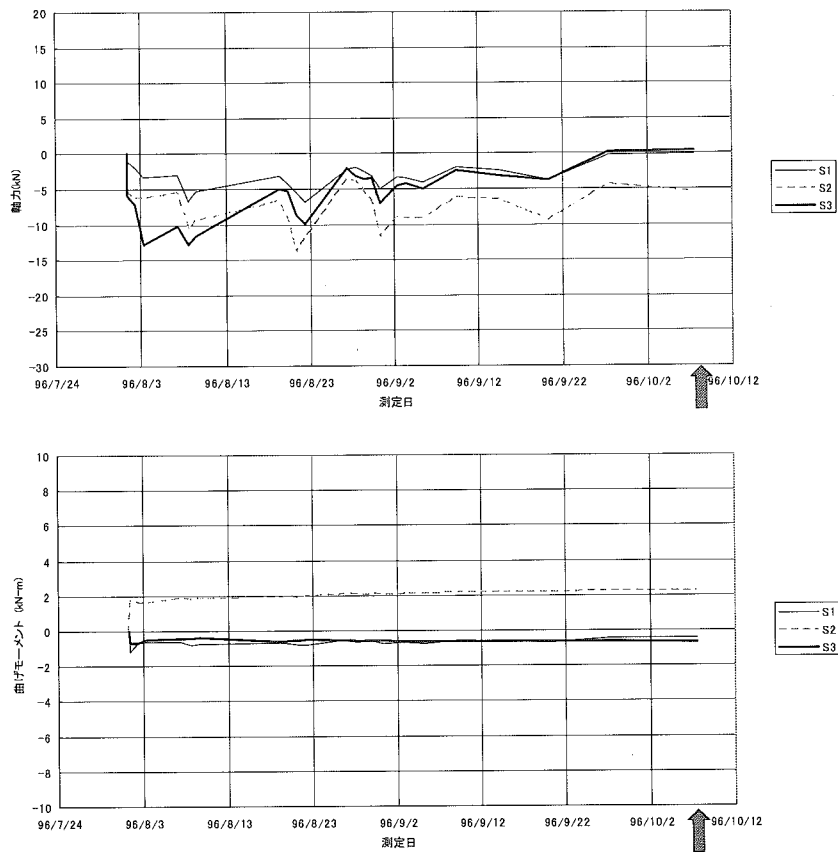


図 4.2.11 Eトンネル（1）の鋼アーチ支保工計測結果

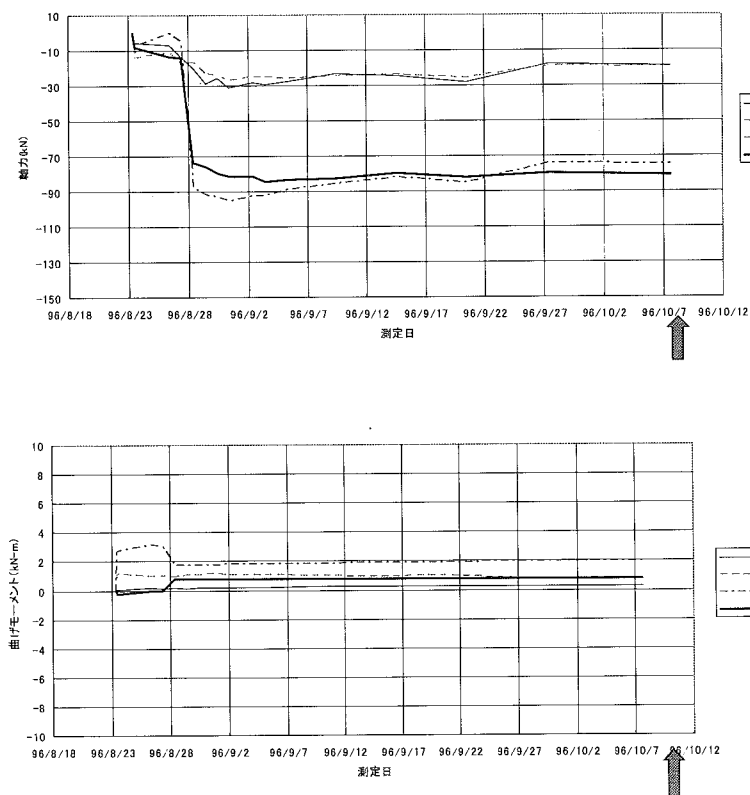


図 4.2.12 Eトンネル（2）の鋼アーチ支保工計測結果

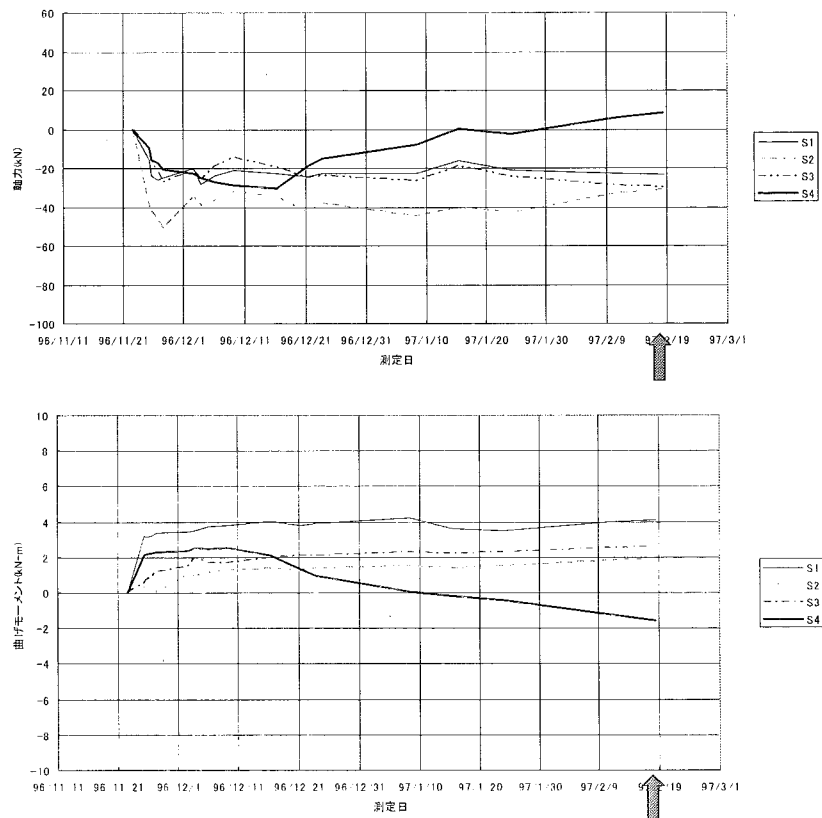


図 4.2.13 Fトンネル（１）の鋼アーチ支保工計測結果

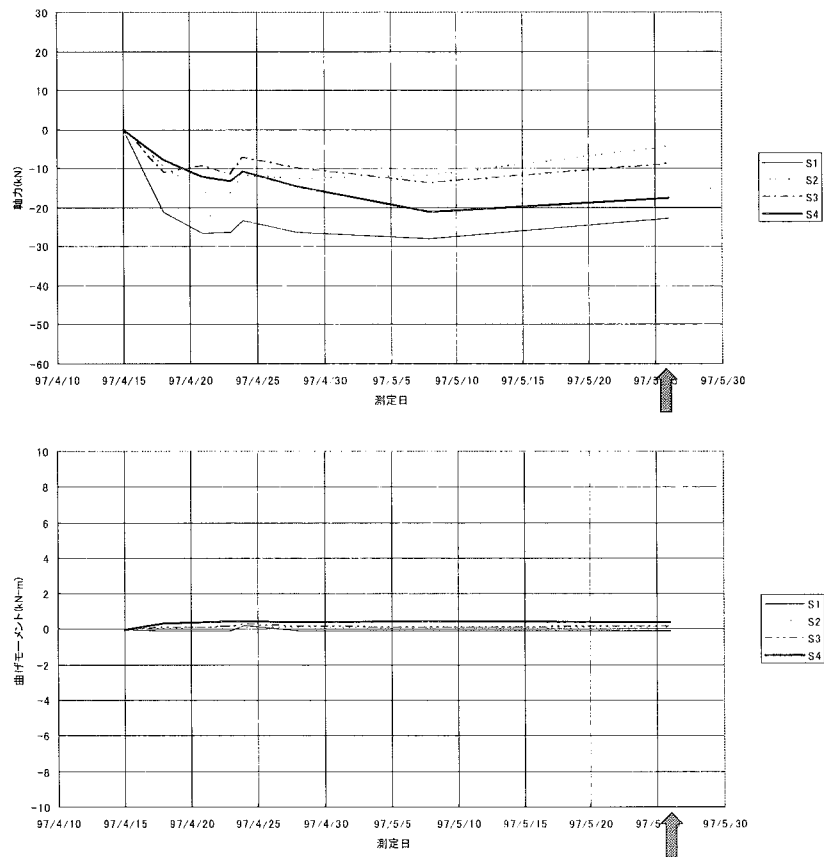


図 4.2.14 Fトンネル（２）の鋼アーチ支保工計測結果

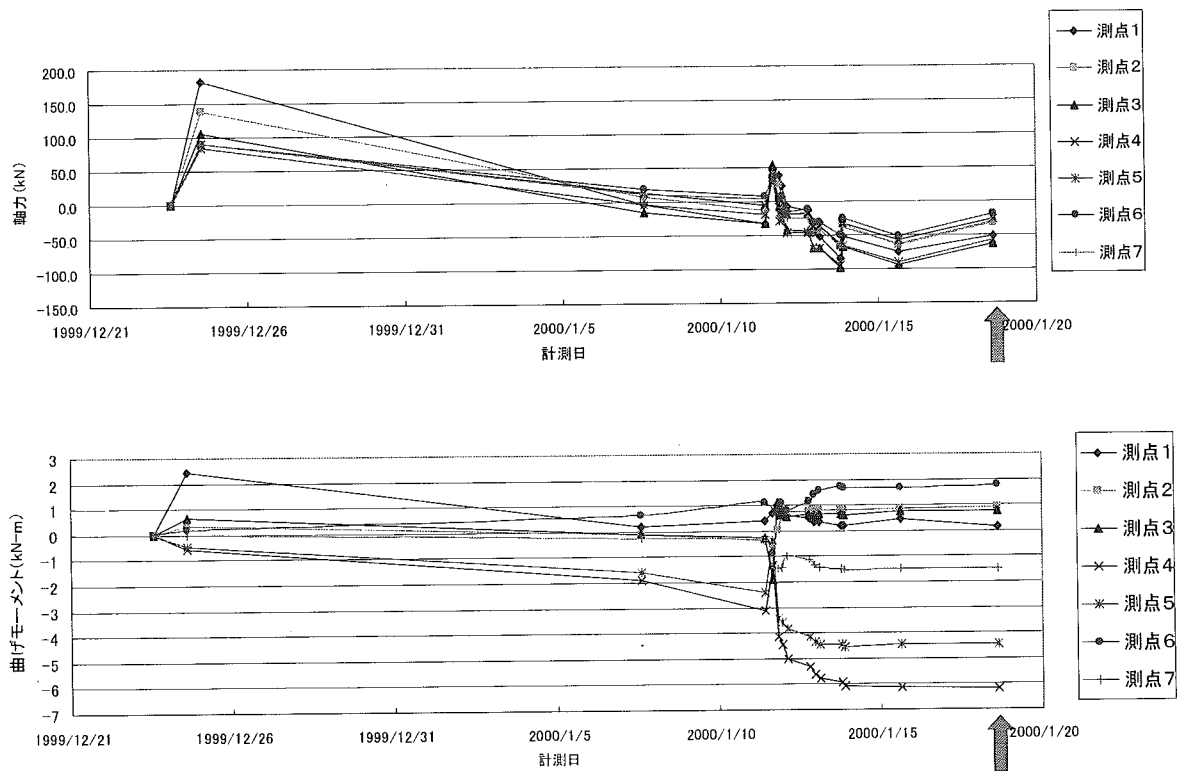


図 4.2.15 Gトンネル（1）の鋼アーチ支保工計測結果

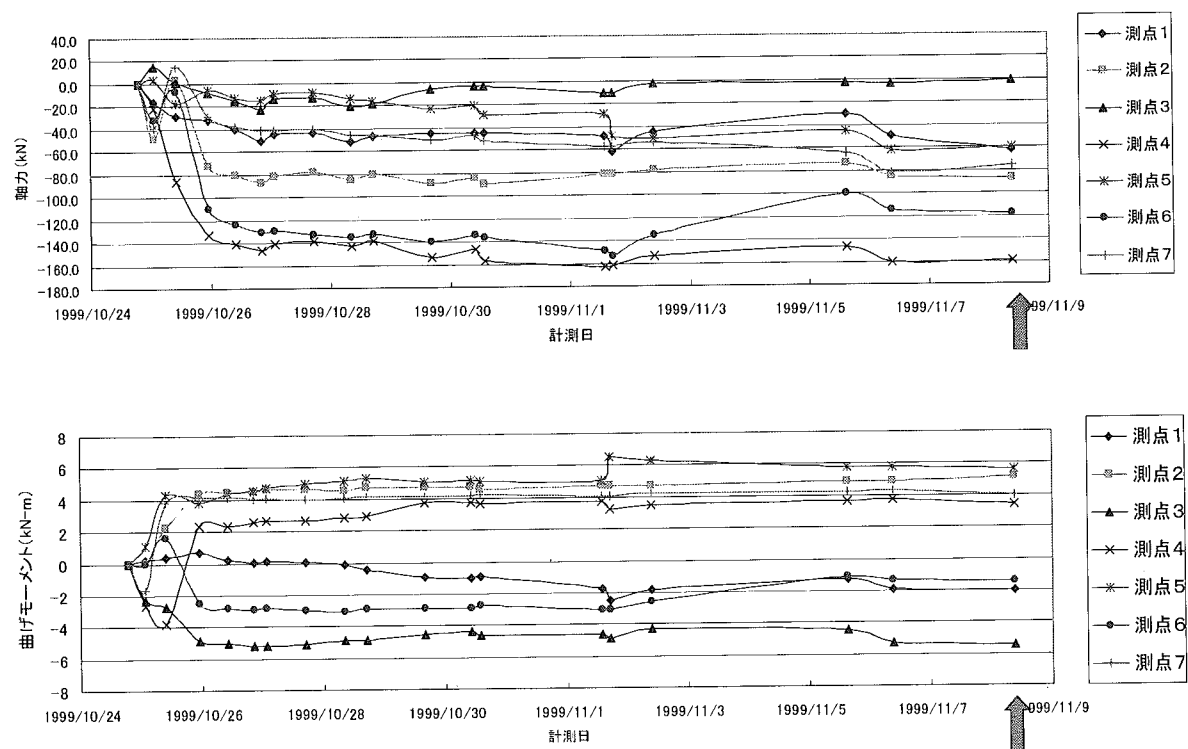


図 4.2.16 Gトンネル（2）の鋼アーチ支保工計測結果

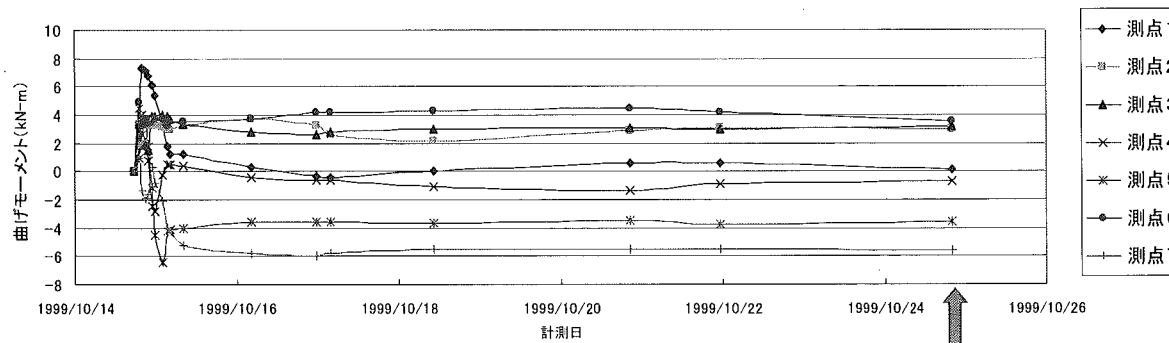
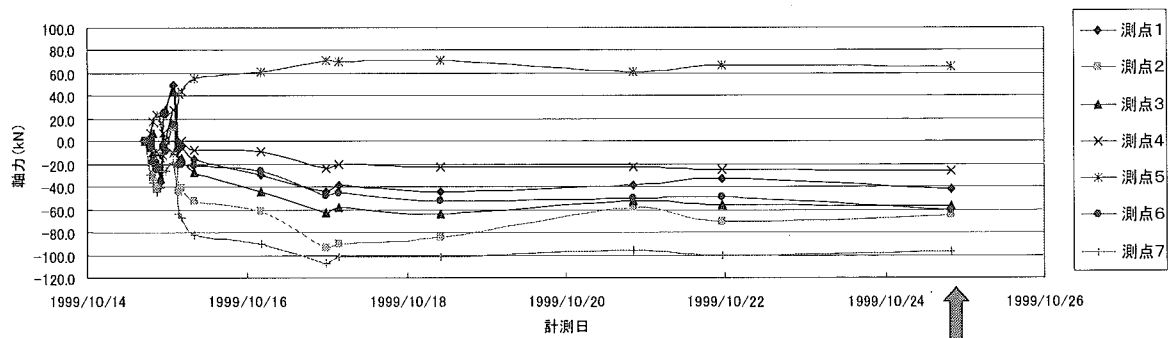


図 4.2.17 Gトンネル（3）の鋼アーチ支保工計測結果

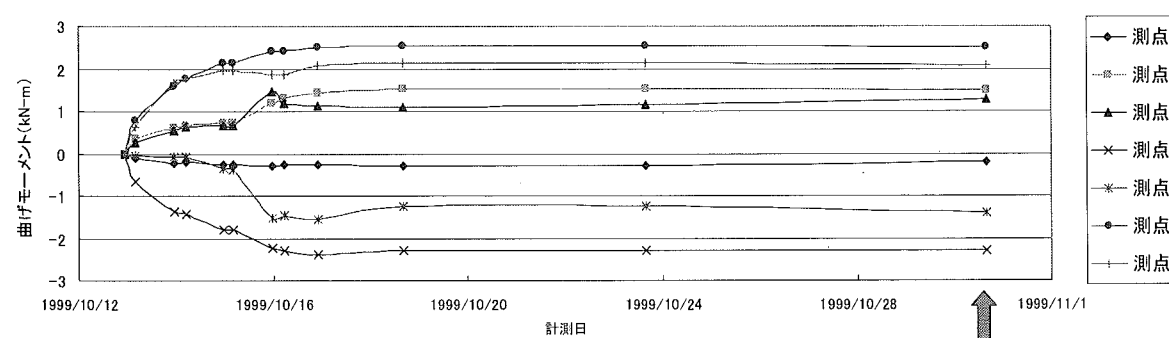
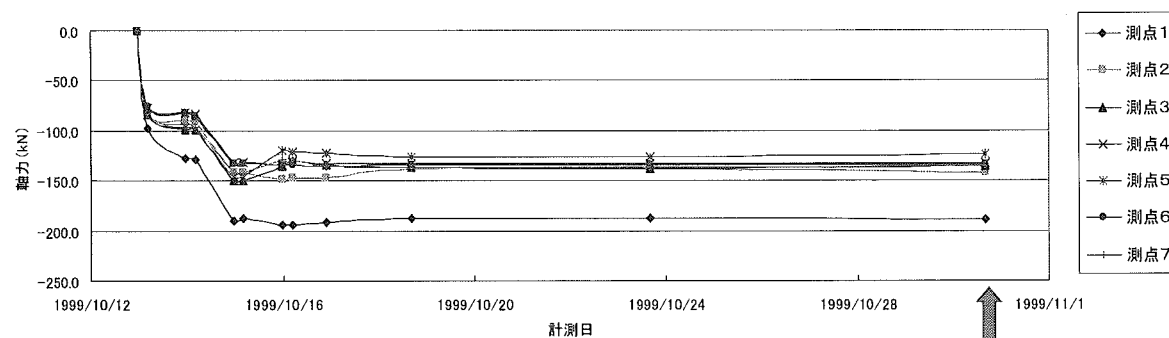


図 4.2.18 Gトンネル（4）の鋼アーチ支保工計測結果

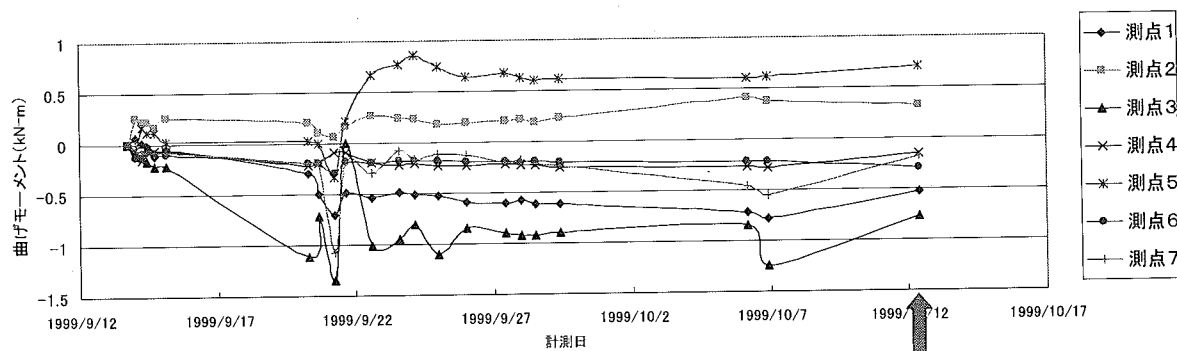
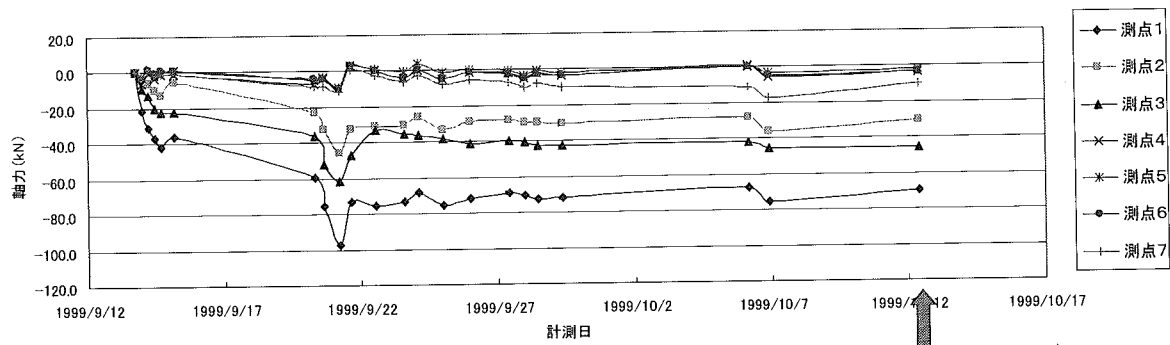


図 4.2.19 Gトンネル (5) の鋼アーチ支保工計測結果

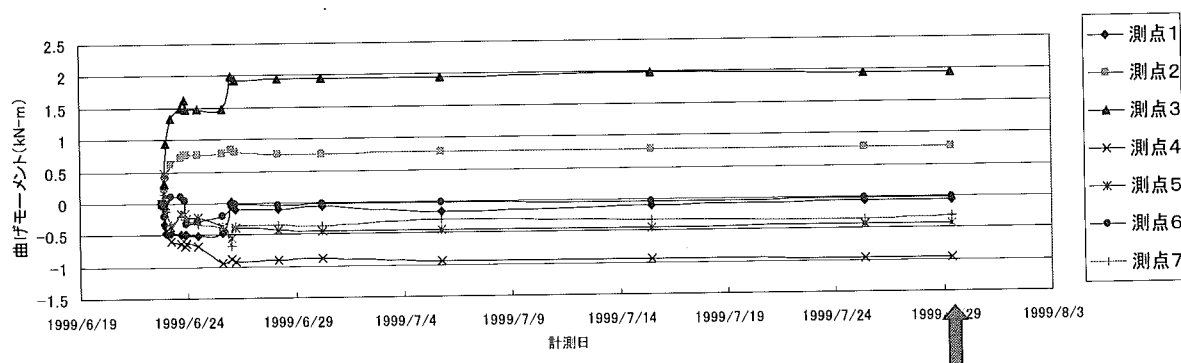
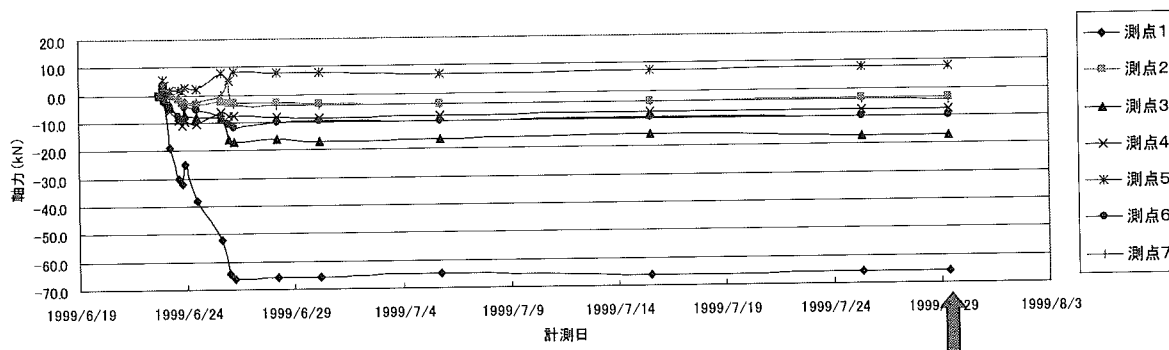


図 4.2.20 Gトンネル (6) の鋼アーチ支保工計測結果

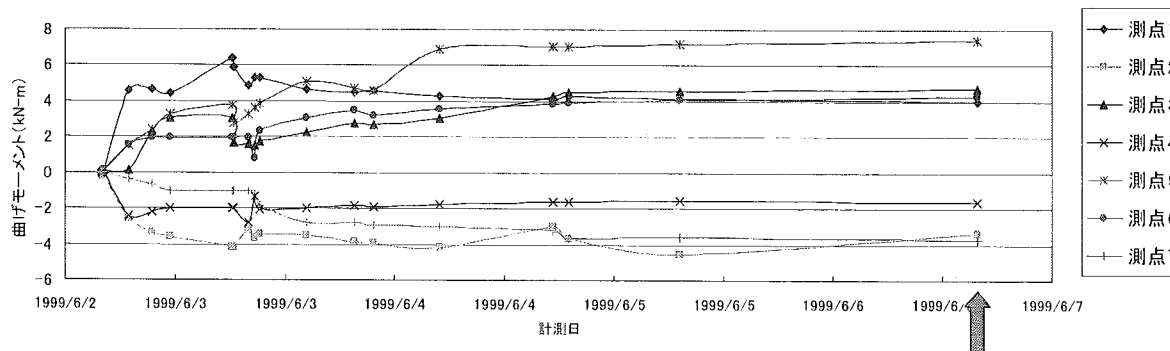
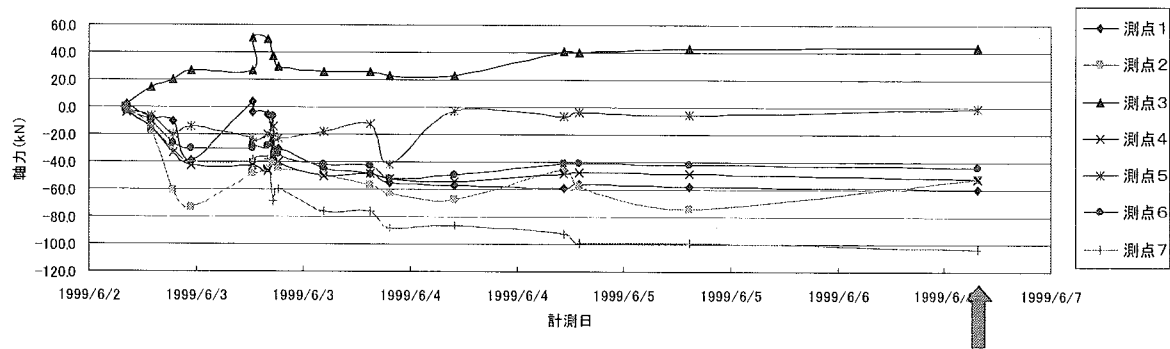


図 4.2.21 Gトンネル (7) の鋼アーチ支保工計測結果

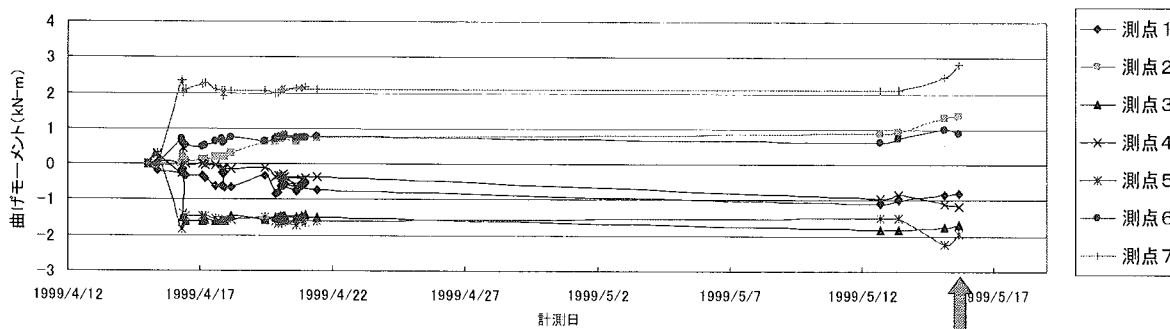
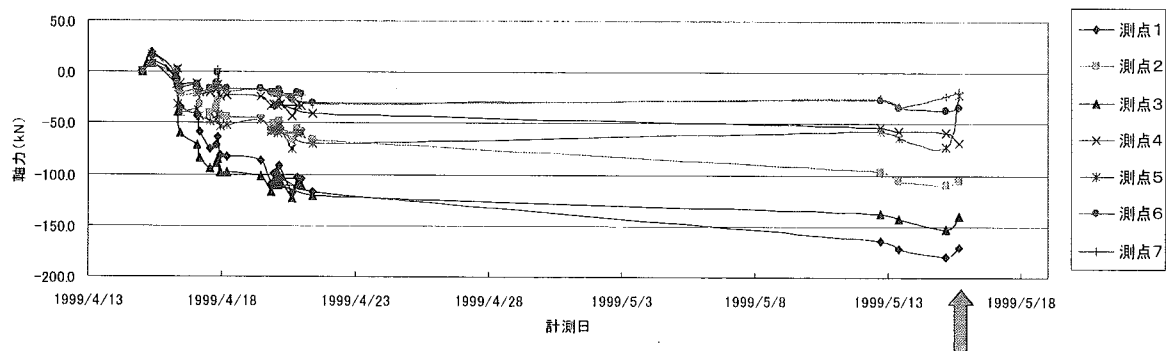


図 4.2.22 Gトンネル (8) の鋼アーチ支保工計測結果

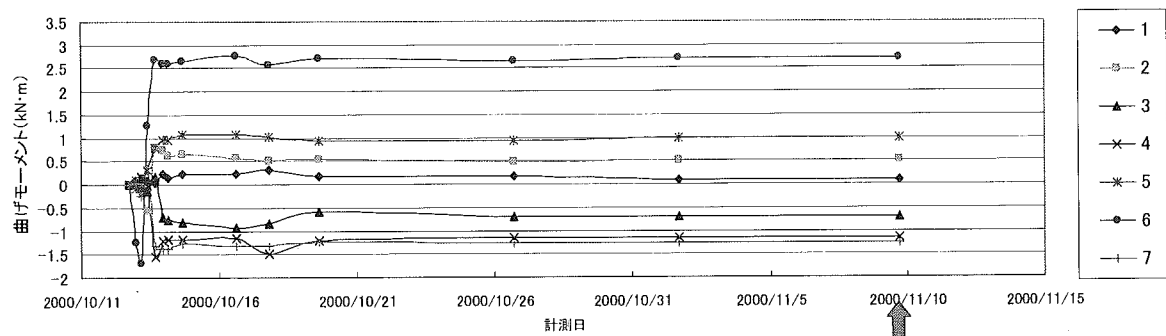
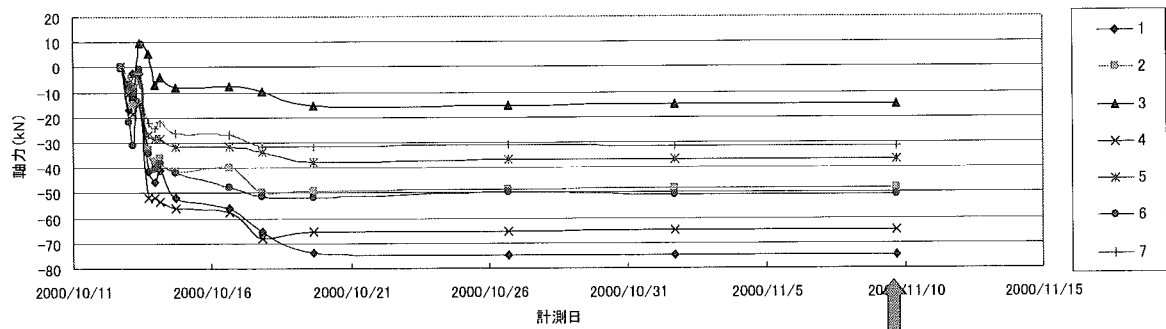


図 4.2.23 Hトンネル（１）の鋼アーチ支保工計測結果

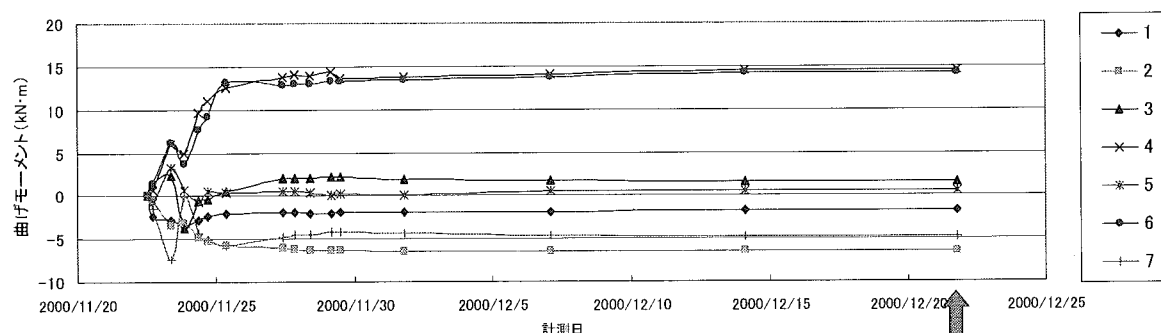
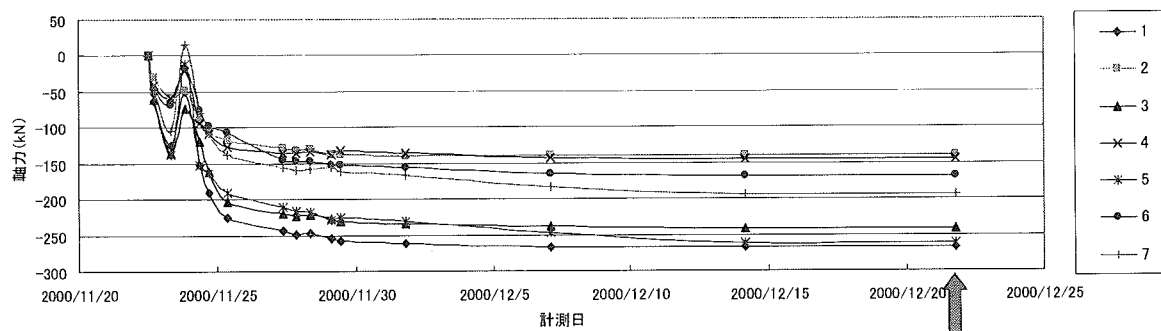


図 4.2.24 Hトンネル（２）の鋼アーチ支保工計測結果

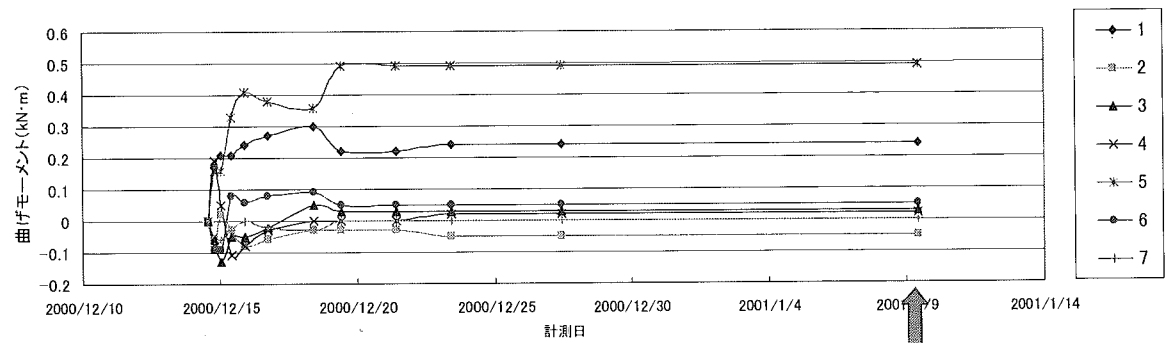
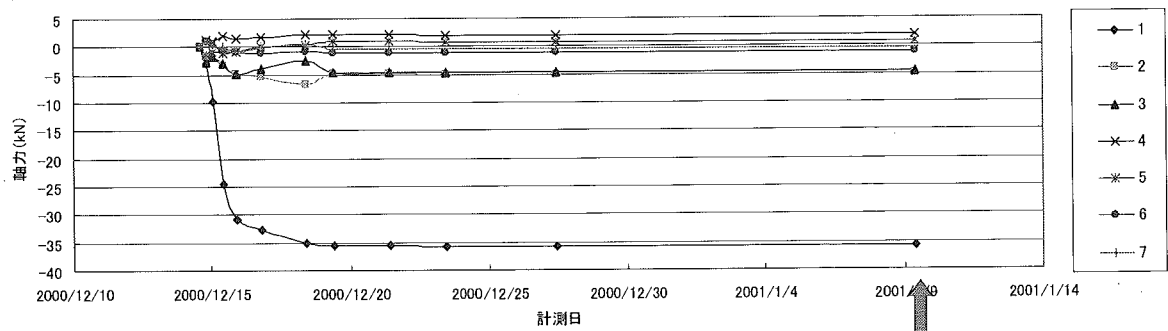


図 4.2.25 Hトンネル (3) の鋼アーチ支保工計測結果

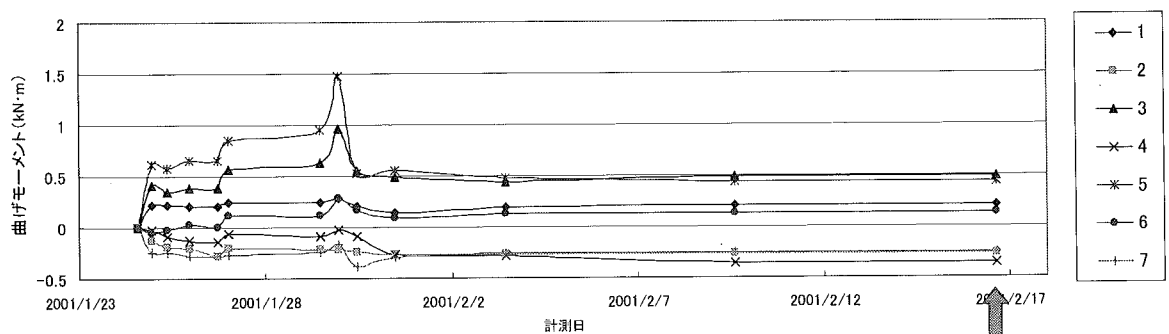
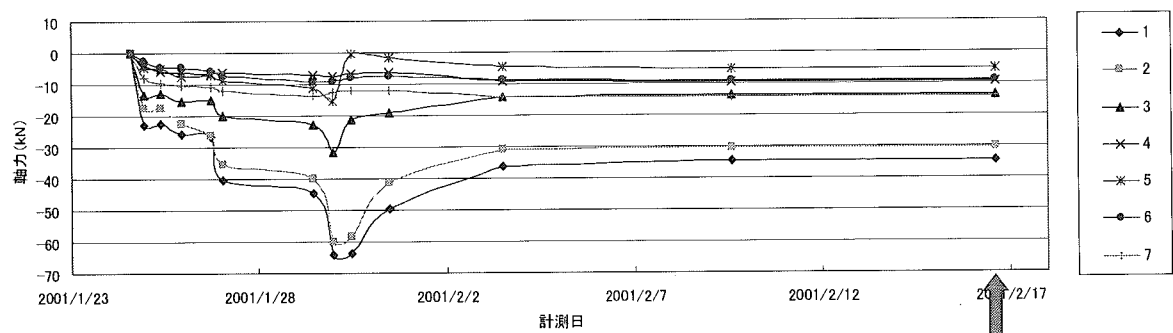


図 4.2.26 Hトンネル (4) の鋼アーチ支保工計測結果

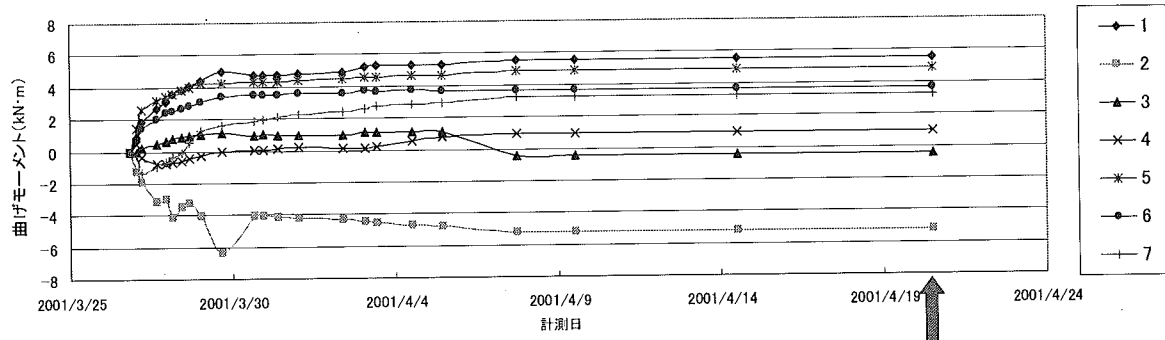
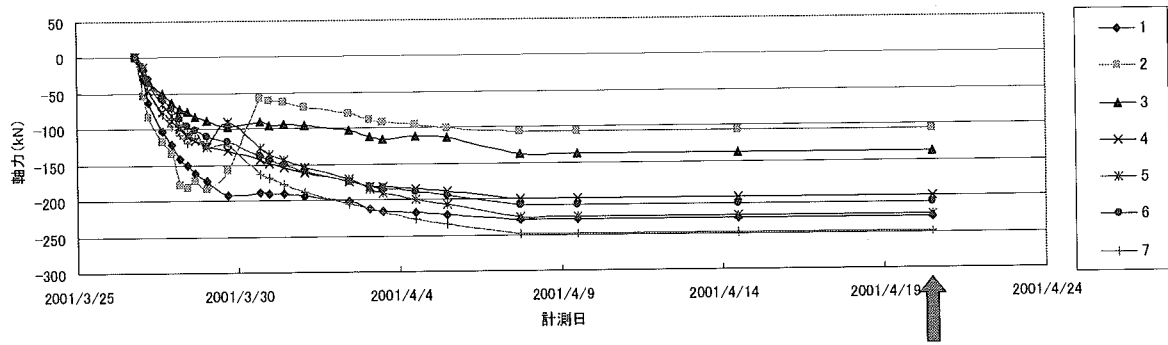


図 4.2.27 Hトンネル（5）の鋼アーチ支保工計測結果

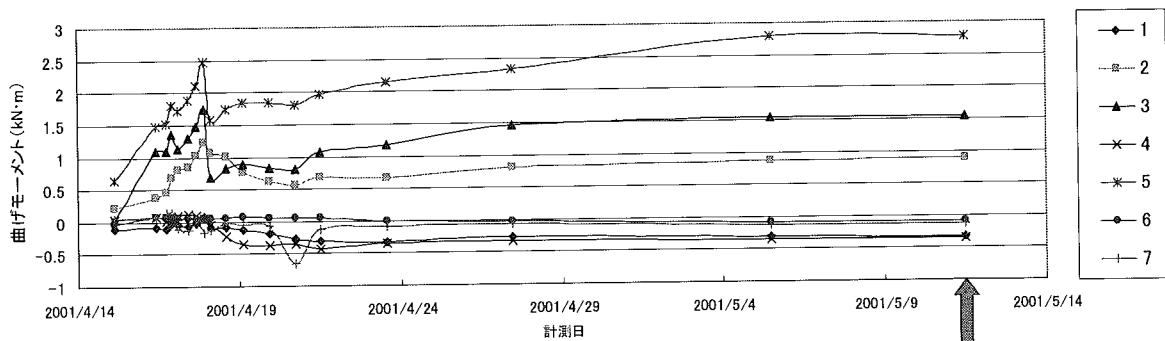
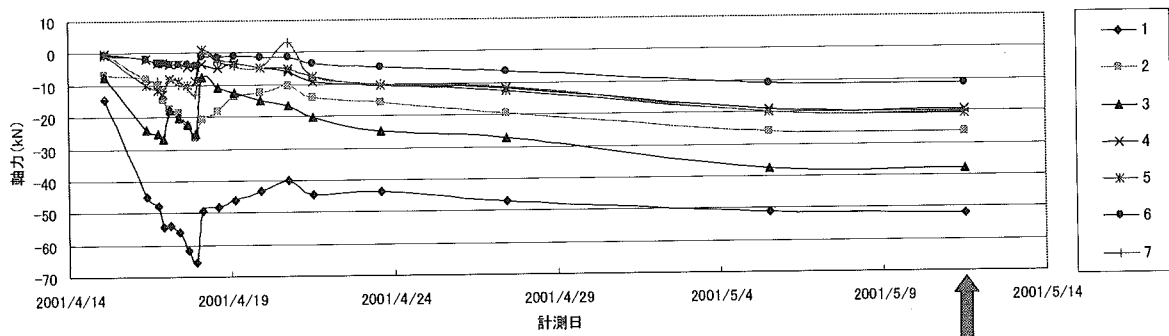


図 4.2.28 Hトンネル（6）の鋼アーチ支保工計測結果

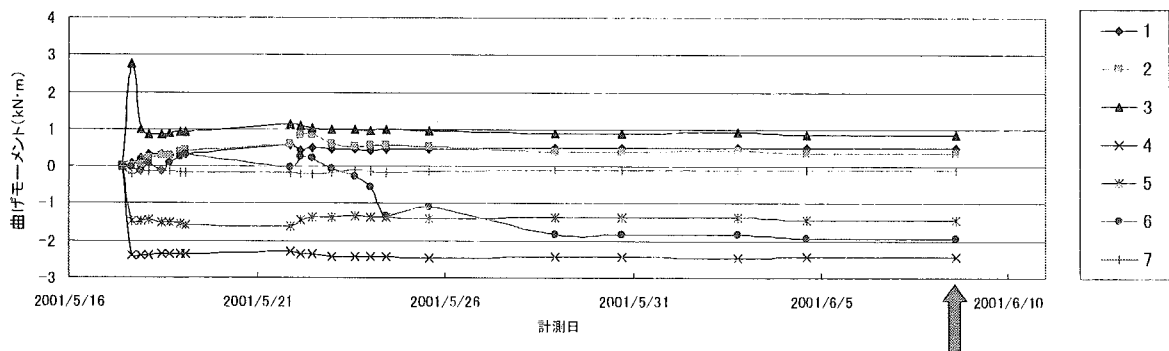
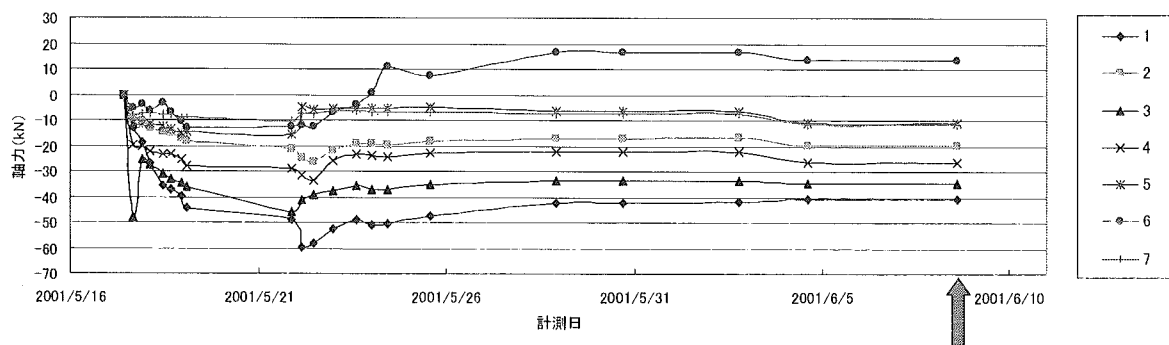


図 4.2.29 Hトンネル（7）の鋼アーチ支保工計測結果

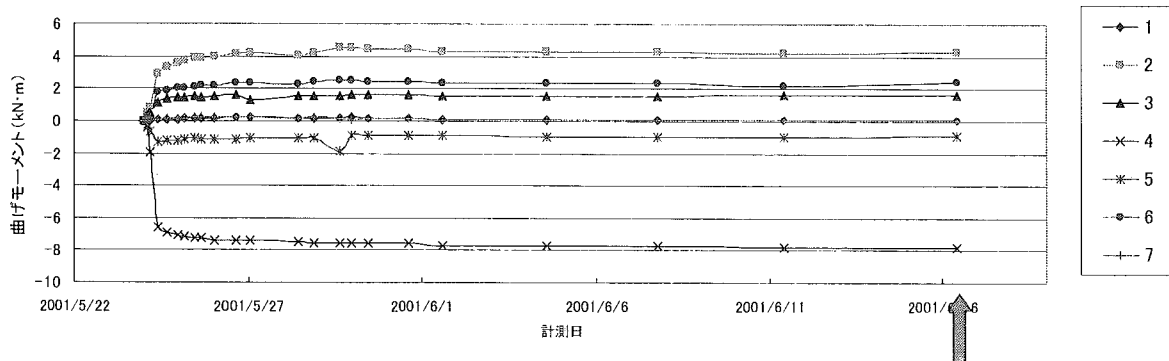
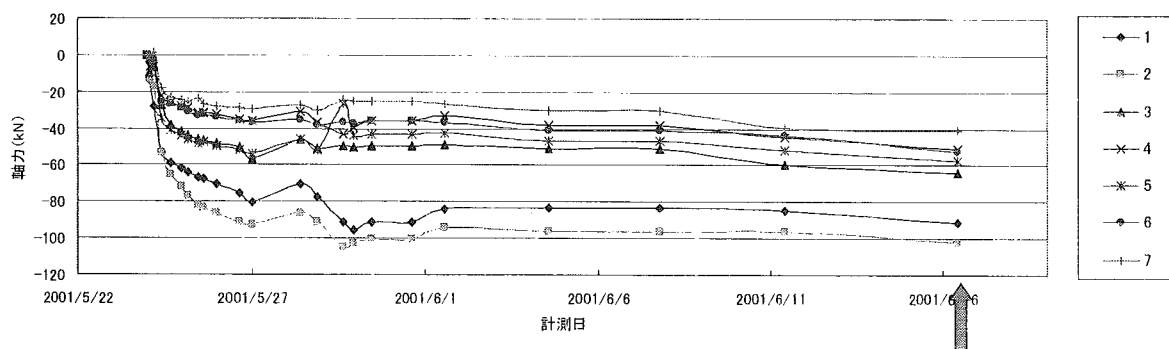


図 4.2.30 Hトンネル（8）の鋼アーチ支保工計測結果

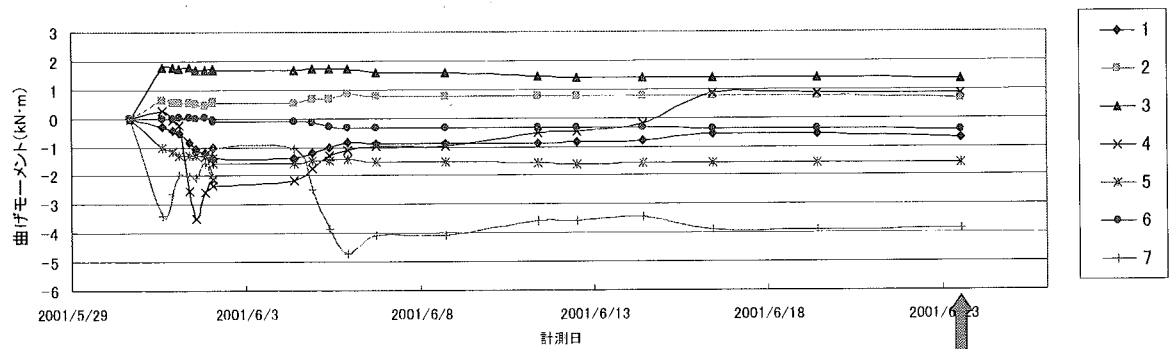
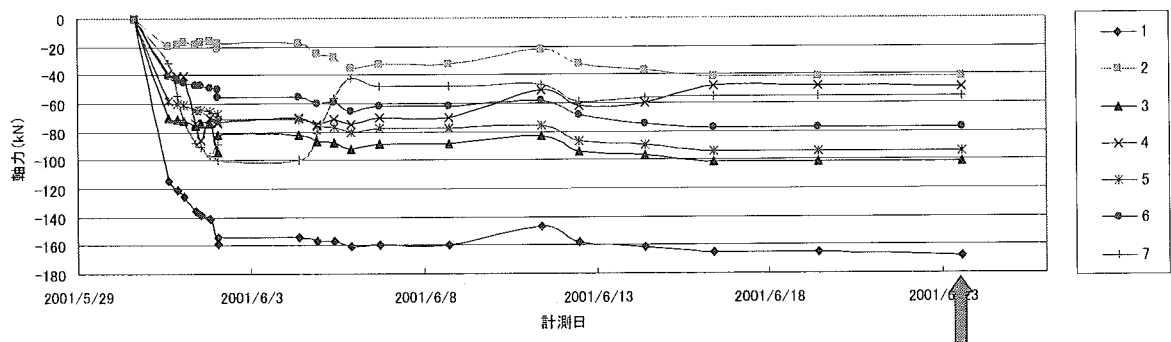


図 4.2.31 Hトンネル（9）の鋼アーチ支保工計測結果

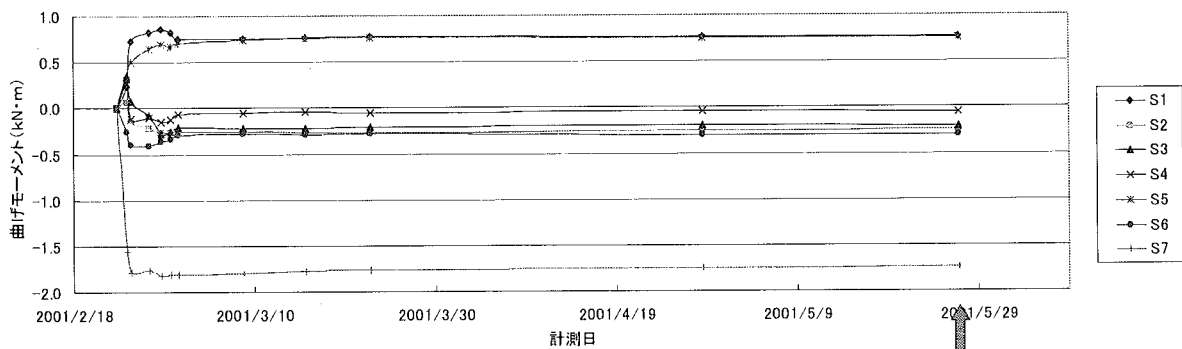
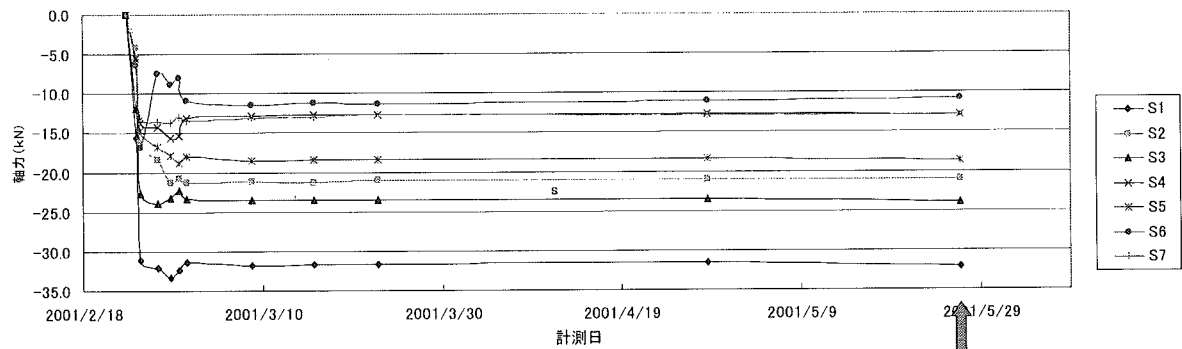


図 4.2.32 Nトンネル（1）の鋼アーチ支保工計測結果

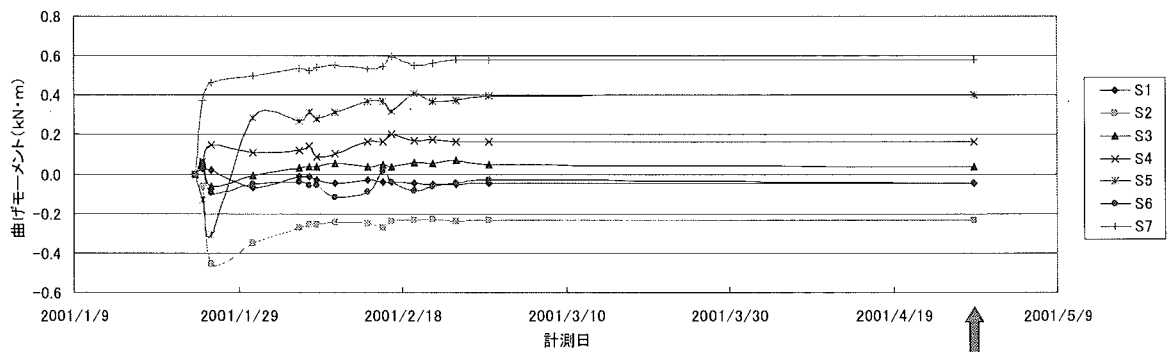
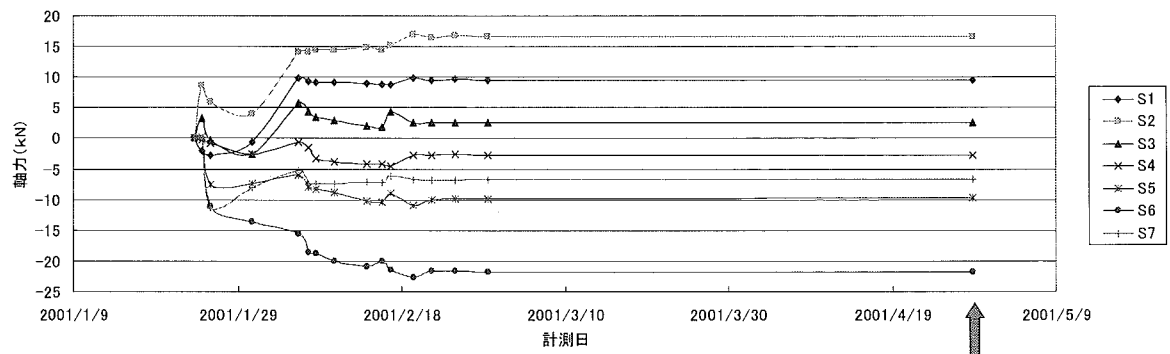


図 4.2.33 Nトンネル（2）の鋼アーチ支保工計測結果

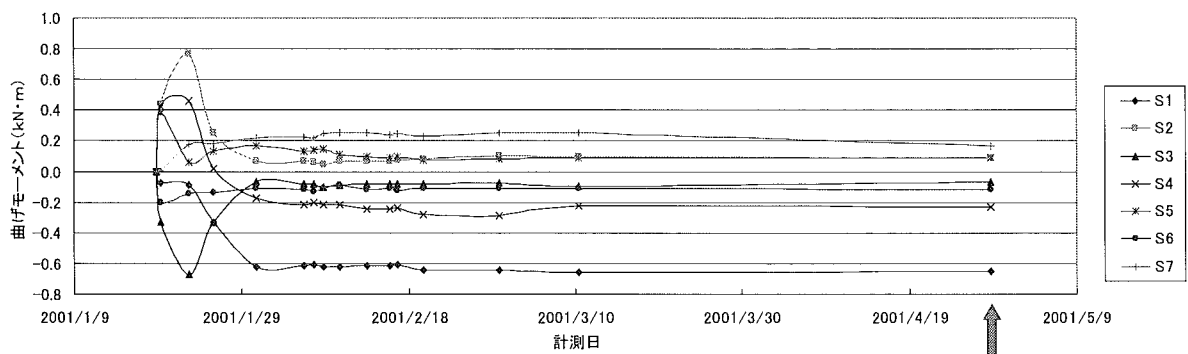
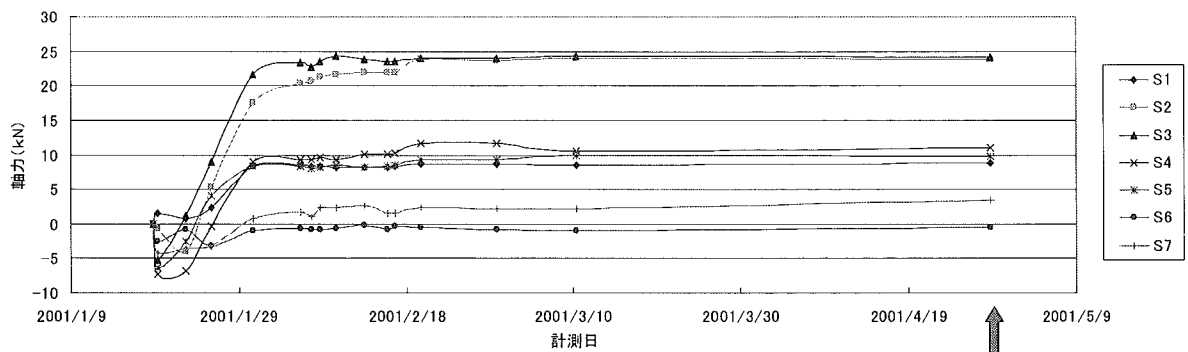


図 4.2.34 Nトンネル（3）の計測用鋼アーチ支保工計測結果

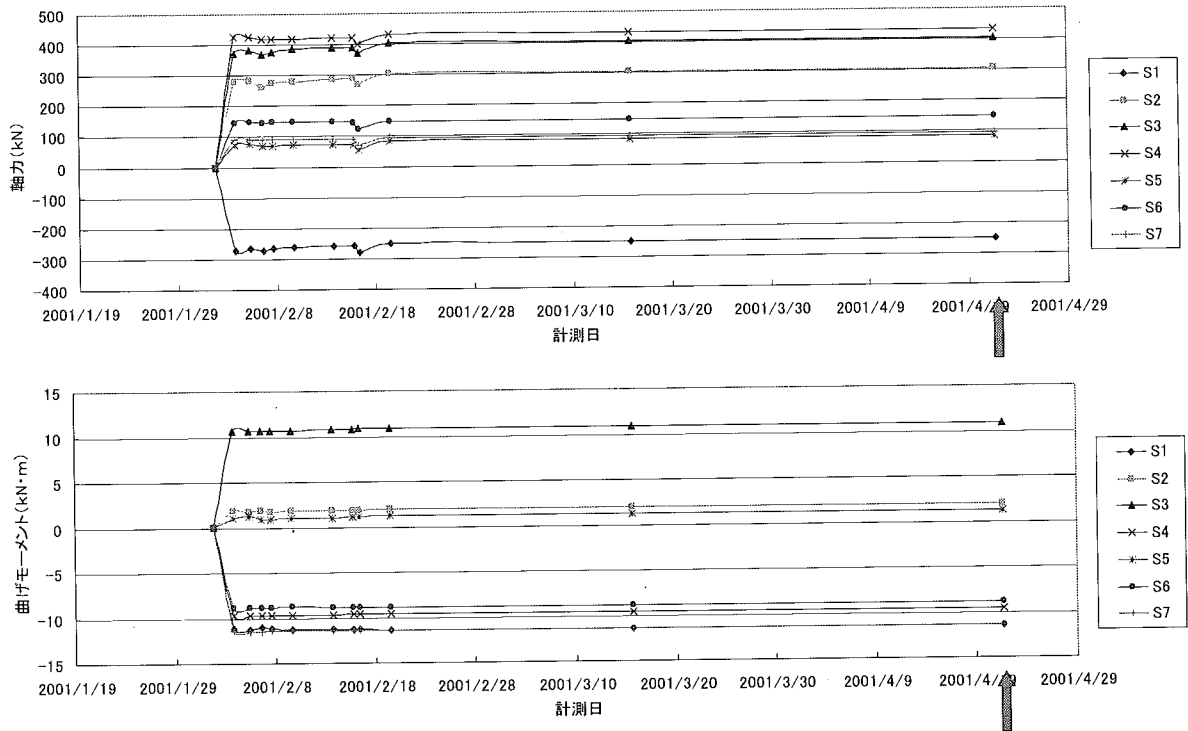


図 4.2.35 Nトンネル（４）の計測用鋼アーチ支保工計測結果

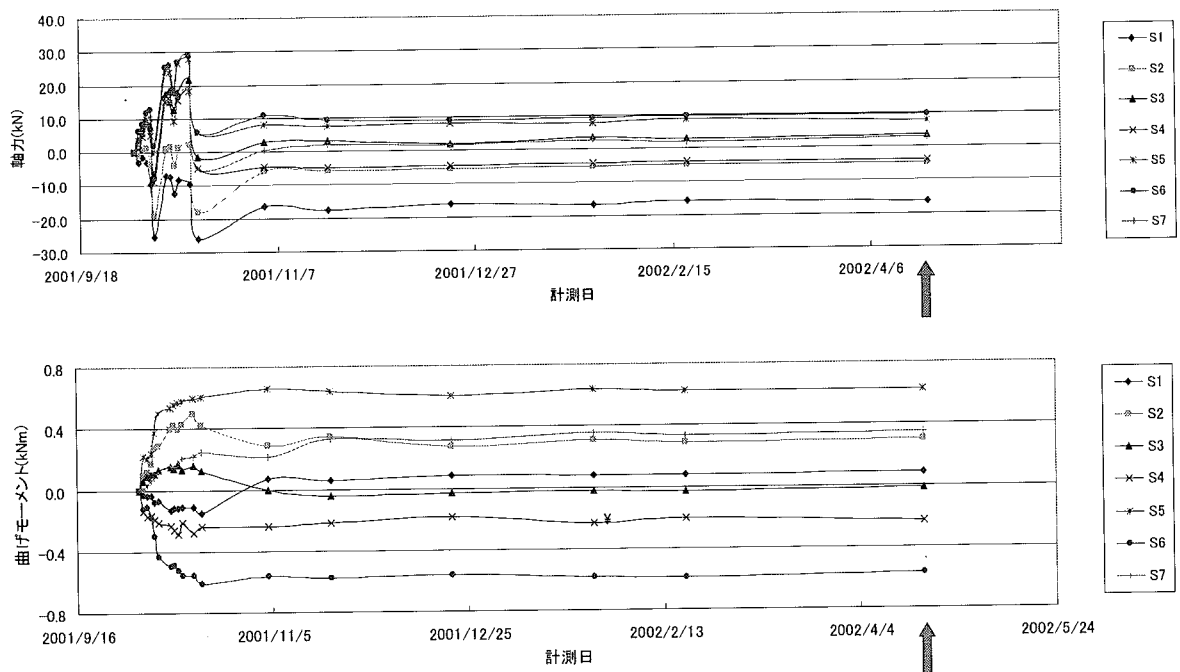


図 4.2.36 Nトンネル（５）の鋼製セグメント計測結果

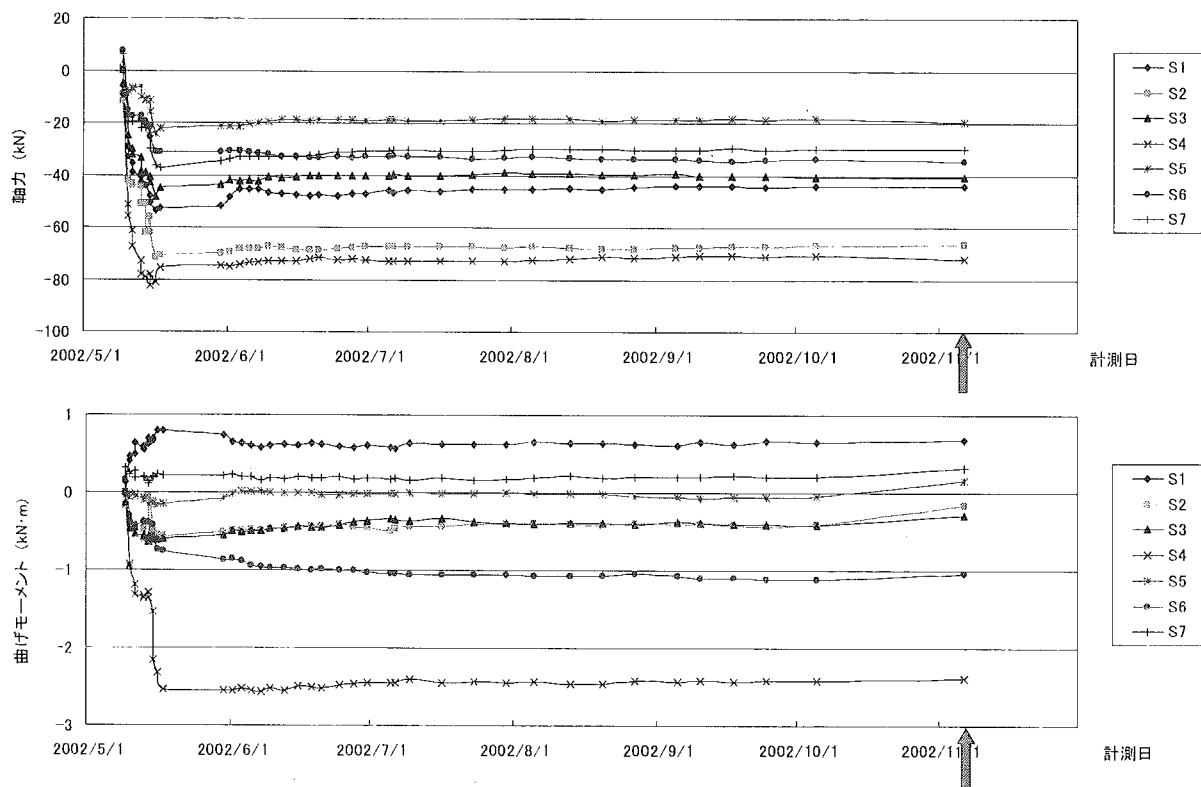


図 4.2.37 Nトンネル（6）の鋼アーチ支保工計測結果

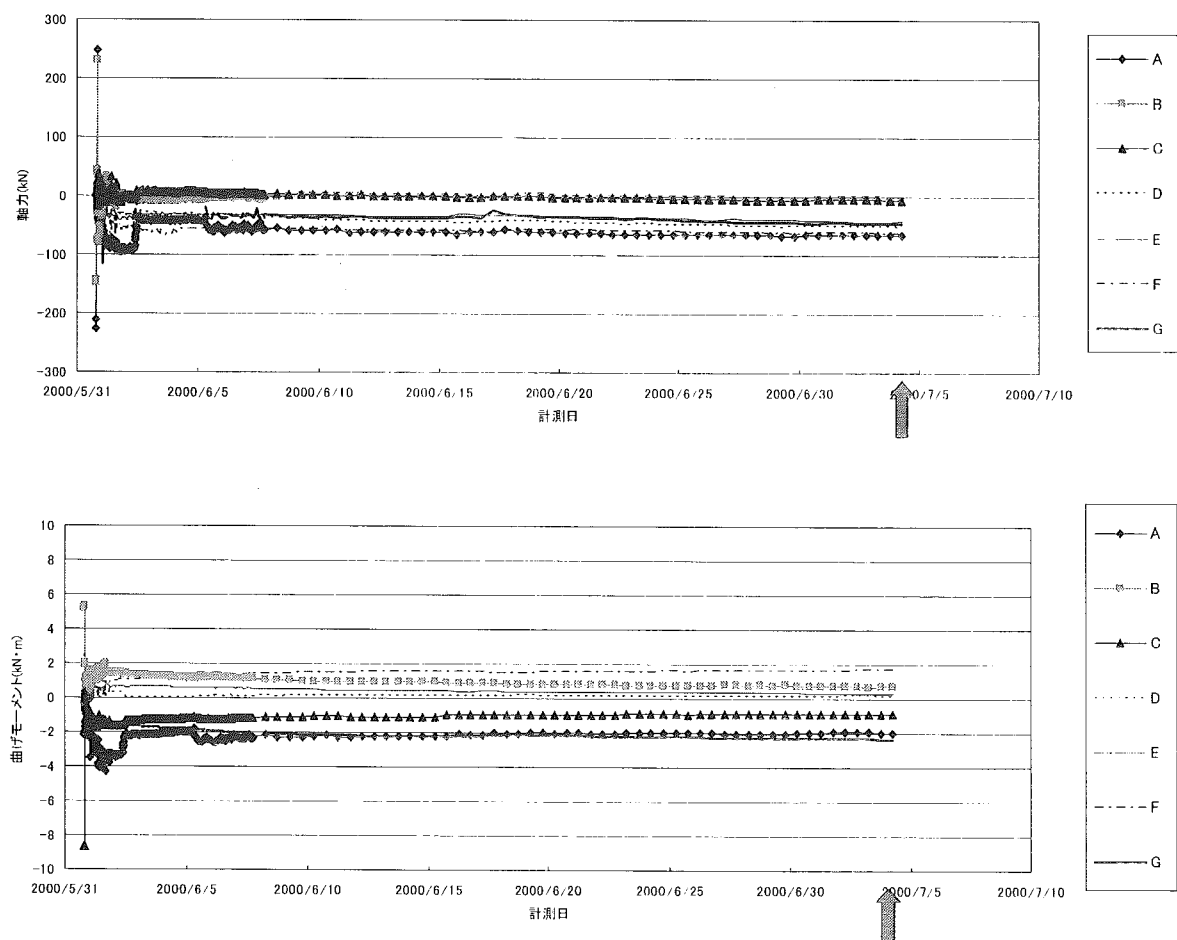


図 4.2.38 Oトンネル（1）の簡易ライナー計測結果

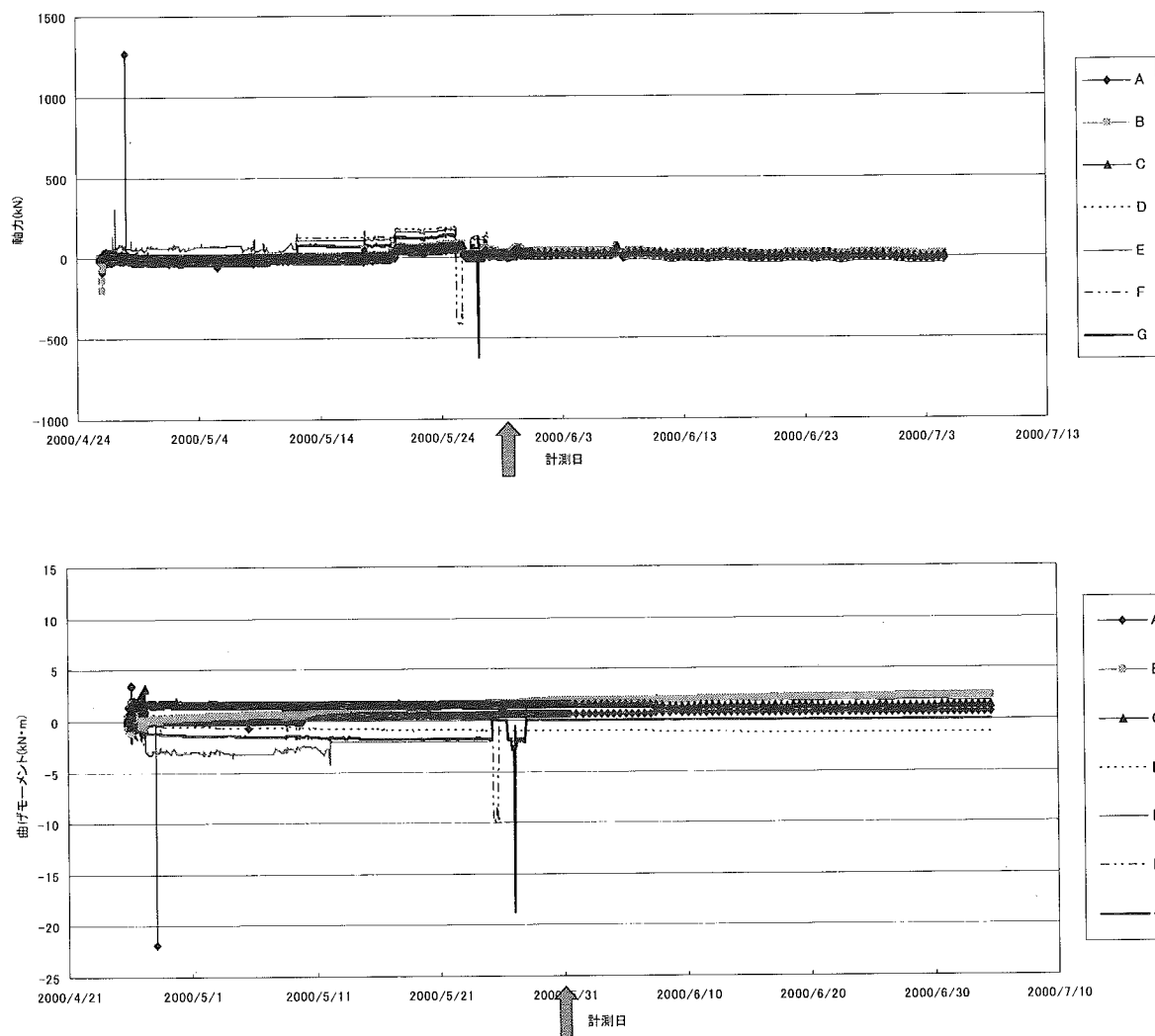


図 4.2.39 Oトンネル（2）の簡易ライナー計測結果

図 4.2.2 から図 4.2.39 に、示した各計測断面における支保工計測結果のうち、矢印で示した解析に用いるデータの値を表 4.2.2 から表 4.2.3 に示す。ただし、軸力は、圧縮を正となるよう変換した。なお、それぞれの計測箇所は、表 4.2.1 を参照のこと。また、断面力算定に用いたひずみの値は、表 4.2.4 に示す。

表 4.2.2 計測箇所の断面力 (曲げモーメント (kNm))

計測 No.	1 (A)	2 (B)	3 (C)	4 (D)	5 (E)	6 (F)	7 (G)
A (1)	-0.07	0.18	0.12	-0.74	—	—	—
A (2)	0.45	0.15	0.19	0.15	—	—	—
A (3)	0.07	-0.02	-0.02	-0.05	—	—	—
A (4)	-0.5	0.38	-0.69	-0.13	—	—	—
A (5)	19.73	0.19	3.52	10.62	—	—	—
B (1)	0.0	0.1	-0.1	—	—	—	—
B (2)	0.8	-1.5	-0.4	—	—	—	—
C (1)	9.7	1.9	1.5	—	—	—	—
C (2)	6.1	7.6	-3.5	—	—	—	—
E (1)	-0.5	2.2	-0.7	—	—	—	—
F (1)	0.2	0.8	2.0	0.8	—	—	—
F (2)	4.1	1.9	2.6	-1.6	—	—	—
F (3)	-0.1	0.1	0.2	0.4	—	—	—
G (1)	0.1	0.9	0.8	-6.2	-4.5	1.8	-1.5
G (2)	-2.0	5.1	-5.4	3.4	5.6	-1.4	3.9
G (3)	0.1	3.0	3.2	-0.7	-3.6	3.6	-5.6
G (4)	-0.2	1.5	1.3	-2.3	-1.4	2.5	2.1
G (5)	-0.3	0.2	-0.5	-0.1	0.5	-0.2	-0.1
G (6)	-0.1	0.5	1.3	-0.7	-0.3	0.0	-0.2
G (7)	4.0	-3.4	4.7	-1.6	7.4	4.2	-3.8
G (8)	-0.8	1.4	-1.7	-1.2	-1.9	0.9	2.8
H (1)	0.09	0.5	-0.69	-1.14	0.99	2.7	-1.28
H (2)	-1.8	-6.56	1.55	14.57	0.49	14.14	-4.84
H (3)	0.16	-0.033	0.02	0.013	0.327	0.033	0.0
H (4)	0.14	-0.18	0.327	-0.24	0.293	0.087	-0.167
H (5)	5.51	-5.19	-0.43	0.95	4.89	3.63	3.23
H (6)	-0.32	0.88	1.53	-0.35	2.78	-0.08	-0.13
H (7)	0.49	0.35	0.84	-2.43	-1.44	-1.93	-0.11
H (8)	0.09	4.28	1.61	-7.84	-0.93	2.46	0.09
H (9)	-0.71	0.69	1.34	0.84	-1.59	-0.43	-3.85
N (1)	0.8	-0.2	-0.2	-0.1	0.7	-0.3	-1.7
N (2)	0.0	-0.13	0.0	0.13	0.27	0.0	0.4
N (3)	-0.6	0.1	-0.1	-0.2	0.1	-0.1	0.2
N (4)	-11.3	1.9	10.9	-9.6	1.3	-8.8	-11.4
N (5)	0.1	0.4	0.0	-0.3	0.8	-0.8	0.5
N (6)	0.7	-0.2	-0.3	-2.4	0.2	-1.0	0.3
O (1)	-2.65	0.98	-1.15	0.23	0.44	2.24	-3.11
O (2)	0.8	2.27	2.0	-1.47	-2.93	2.0	-2.67

表 4.2.3 計測箇所の断面力 (軸力 (kN))

計測 No.	1 (A)	2 (B)	3 (C)	4 (D)	5 (E)	6 (F)	7 (G)
A (1)	-16.6	7.7	-0.9	-10.2	—	—	—
A (2)	-23.4	-8.5	-2.1	1.4	—	—	—
A (3)	1.8	-2.8	-1.8	-1.8	—	—	—
A (4)	-14.8	-19.7	-25.8	4.9	—	—	—
A (5)	-666.1	-73.5	-603.2	-120.7	—	—	—
B (1)	-3.2	-0.3	-0.8	—	—	—	—
B (2)	-24.3	7.9	3.7	—	—	—	—
C (1)	280.7	259.1	533.6	—	—	—	—
C (2)	212.2	62.8	163.6	—	—	—	—
E (1)	0.2	5.5	-0.3	—	—	—	—
F (1)	19.2	19.7	74.7	81.0	—	—	—
F (2)	23.2	30.9	29.6	-8.3	—	—	—
F (3)	22.8	4.4	9.0	17.6	—	—	—
G (1)	51.3	33.3	63.5	26.4	57.7	19.5	31.5
G (2)	61.7	87.3	1.0	159.1	59.5	118.4	75.9
G (3)	41.6	65.2	56.7	25.5	-66.2	60.5	97.3
G (4)	189.2	141.4	135.7	132.2	123.7	134.3	135.7
G (5)	46.5	20.3	30.2	2.3	1.4	2.1	6.6
G (6)	44.0	2.1	11.5	5.2	-5.2	6.7	2.9
G (7)	59.8	52.4	-43.5	52.4	0.7	43.5	104.2
G (8)	171.2	105.0	139.7	69.1	22.0	34.7	19.4
H (1)	74.9	48.3	14.9	65.0	36.8	50.8	31.4
H (2)	268.0	139.9	241.8	144.2	261.9	169.2	195.1
H (3)	23.9	3.5	3.0	-1.4	-0.5	0.8	0.3
H (4)	23.0	20.3	9.2	6.5	3.6	6.0	9.3
H (5)	229.4	107.2	138.3	200.3	224.7	208.9	248.8
H (6)	51.9	26.6	38.1	19.4	20.8	11.5	20.3
H (7)	40.8	19.9	34.5	26.2	11.1	-13.5	11.5
H (8)	91.1	102.2	64.1	50.8	57.5	52.3	41.1
H (9)	168.1	42.0	101.7	48.5	94.5	77.8	55.5
N (1)	32.0	21.0	23.9	12.9	18.6	10.8	12.9
N (2)	-6.4	-11.1	-1.7	1.9	6.5	14.5	4.5
N (3)	-8.8	-23.9	-24.1	-11.1	-9.7	0.5	-3.4
N (4)	251.4	-305.8	-402.9	-433.0	-82.8	-147.0	-92.8
N (5)	21.9	6.5	-4.7	5.2	-10.6	-12.9	-4.0
N (6)	-44.2	-66.7	-40.7	-72.2	-19.5	-34.7	-29.9
O (1)	87.0	8.0	8.6	69.1	56.4	84.5	59.7
O (2)	-15.5	-50.0	-40.5	12.3	-160.8	-182.7	-109.2

表 4.2.4 断面力算定に用いたひずみの値 (μ)

計測 No.	1 (A) 外	1 (A) 内	2 (B) 外	2 (B) 内	3 (C) 外	3 (C) 内	4 (D) 外	4 (D) 内	5 (E) 外	5 (E) 内	6 (F) 外	6 (F) 内	7 (G) 外	7 (G) 内
A (1)	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	—	—	—	—	—	—
A (2)	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	—	—	—	—	—	—
A (3)	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	—	—	—	—	—	—
A (4)	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	—	—	—	—	—	—
A (5)	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	—	—	—	—	—	—
B (1)	不明	不明	不明	不明	不明	不明	—	—	—	—	—	—	—	—
B (2)	不明	不明	不明	不明	不明	不明	—	—	—	—	—	—	—	—
C (1)	不明	不明	不明	不明	不明	不明	—	—	—	—	—	—	—	—
C (2)	不明	不明	不明	不明	不明	不明	—	—	—	—	—	—	—	—
E (1)	10	-10.5	-59.5	42	16	-15	—	—	—	—	—	—	—	—
F (1)	-51.5	-33	-74	-13	-240	-90	-209	-149	—	—	—	—	—	—
F (2)	-131	57	-92.5	-5.5	-106	11.5	48.5	-22	—	—	—	—	—	—
F (3)	-46	-54.5	-13	-6.5	-25.5	-14	-54.5	-23	—	—	—	—	—	—
G (1)	-106	-117	-39	-106	-109	-167	-288	173	-292	41	23	-108	-124	-13
G (2)	-144	-52	-23	-254	-150	99	-161	-300	51	-164	-290	-153	8	-210
G (3)	-21	-23	-12	-57	-6	-54	-19	-8	-52	-8	7	-59	-94	-9
G (4)	-419	-404	-252	-363	-246	-340	-374	-202	-322	-238	-191	-387	-215	-374
G (5)	-171	-132	-54	-78	-116	-53	-6	10	26	-18	-9	16	-31	-2
G (6)	-146	-141	22	-36	35	-110	-53	19	0	33	-23	-21	-21	2
G (7)	19	-279	-239	11	412	-89	46	-273	1162	-328	2483	-5211	9458	1306
G (8)	-287	-251	-134	-196	-257	-182	-135	-82	-78	9	-35	-74	33	-94
H (1)	-34	-35	-19	-25	-11	-2	-37	-22	-10	-23	-6	-41	-23	-6
H (2)	-134	-111	-107	-21	-100	-121	29	-161	-116	-123	15	-170	-121	-57
H (3)	-15	-18	-3	-2	-2	-2	1	1	4	-3	0	0	0	0
H (4)	-14	-17	-16	-12	-3	-9	-7	-2	0	-5	-3	-5	-8	-5
H (5)	-69	-141	-83	-15	-66	-60	-85	-98	-71	-135	-72	-119	-93	-135
H (6)	-26	-22	-6	-18	-7	-27	-11	-7	9	-28	-6	-5	-10	-8
H (7)	-15	-22	-7	-11	-10	-21	-28	4	-14	4	-6	19	-6	-5
H (8)	-41	-42	-19	-75	-19	-40	-74	28	-32	-20	-8	-40	-18	-19
H (9)	-81	-72	-15	-24	-38	-55	-17	-28	-54	-33	-38	-33	-50	0
N (1)	-101	-42	-37	-56	-45	-61	-27	-31	-70	-13	-13	-36	-39	-96
N (2)	23	20	46	28	4	7	-13	0	-37	-6	-47	-50	-37	8
N (3)	45	-6	50	57	56	51	34	16	18	25	4	-6	1	14
N (4)	-121	-994	603	753	475	1312	1328	592	133	234	666	-15	646	-234
N (5)	-51	-38	11	8	-29	72	-20	36	-36	-120	-62	13	-31	-6
N (6)	-124	-72	-142	-154	-79	-102	-68	-252	-50	-37	-37	-117	-79	-54
O (1)	-320	31	-99	53	23	-35	-332	80	-84	-67	59	-232	-732	377
O (2)	85	-26	239	-57	209	-57	-126	61	-10	371	401	128	-63	291.4

※注: 不明と記載の部分は, 計測データ入手時に既に断面力に換算されており, ひずみそのものの値が不明であったものを示す.

4.3 解析手法

4.3.1 荷重の算出方法

ここでは、TBMにより施工されたトンネルの支保工に作用している荷重（鉛直荷重 P_v と側圧係数 λ ）について検討する。なお、鉛直荷重 P_v は、トンネルの掘削径 D と地山の単位体積重量 γ で除し、換算土荷重高さ $P_v/\gamma D$ で評価する。

荷重の算定は、支保工を対象とした骨組み構造解析を行い、計測された支保工の応力と誤差が最小となるような荷重を算定することで行う。すなわち、式 (4.3.1) のように計測ひずみ値をもとに算定した断面力より求まる応力 σ_i^* と骨組み構造解析により算定される断面力より求まる応力 σ_i とから成る誤差関数 ε を最小となる荷重を算定する。

$$\varepsilon = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\sigma_i^* - \sigma_i)^2} \rightarrow \min \quad \cdots \text{式 (4.3.1)}$$

なお、 n ：計測点数（各計測断面における計測点数であり、トンネル毎で異なる。すなわち、3～7）である。実際の解析では、図 4.3.1 に示すように、側圧係数 λ を 0.1 ピッチ、鉛直荷重 $P_v/\gamma D$ を 0.03 ピッチで変化させ、誤差が最小とする荷重を算定するトライアル解析を実施した。

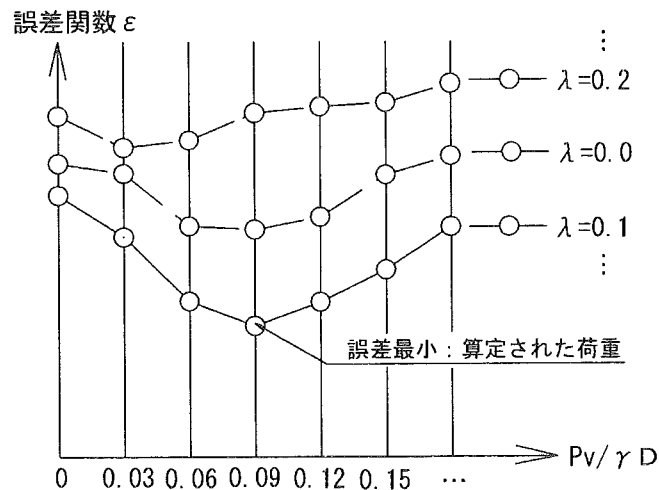


図 4.3.1 荷重算定のイメージ図

また、計測断面力や骨組み構造解析により算定された断面力から応力を求める場合は、次式によった。

$$\sigma = \frac{M}{I} y + \frac{N}{A} \quad \cdots \text{式 (4.3.2)}$$

ただし、 σ ：計測断面力や骨組み構造解析により算定された断面力より求めるそれぞれの応力、 M ：計測断面力や骨組み構造解析により算定されたそれぞれの曲げモーメント、 I ：支保工の断面二次モーメント、 y ：支保工縁の中立軸からの距離、 N ：計測断面力や骨組み構造解析により算定されたそれぞれの軸力、 A ：支保工の断面二次モーメント

4.3.2 骨組み構造解析のモデル

本研究の骨組み構造解析では、シールドトンネルにおいて用いられるモデル（剛性一様-地盤全周ばねモデル）を参考に設定した図 4.3.2 に示す解析モデルを用いた。

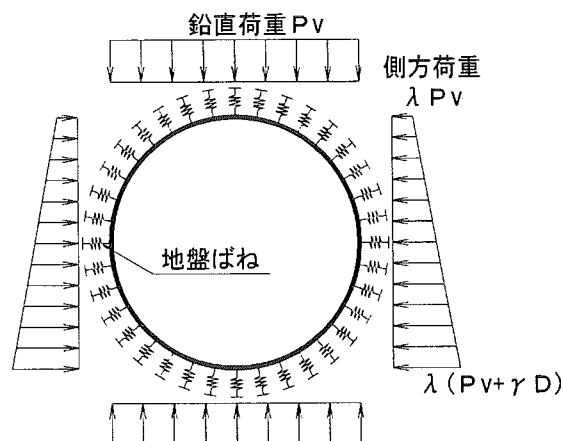


図 4.3.2 骨組み構造解析のモデル

これは、解析モデルを用いたのは、以下の考えた方による。すなわち、本モデルの適用にあたっては、シールドトンネルのセグメントを参考にいくつかの計算モデルを考え、それらを TBM 支保工に適用する場合の得失について表 4.3.1 のように整理した。このように、地盤反力を適切に評価することで地盤の特性をモデル化でき、かつ、堅固な地盤のアーチ作用を利用した薄肉 TBM 支保工に作用する荷重を精度よく算定するのに適したモデルとしては、全周地盤ばねモデルであると考えた。しかし、TBM 支保工の計算モデルについては、現在定まったものがなく、本研究で設定した支保工の計算モデルの妥当性については、今後さらに検討を加えていく必要がある。また、本研究で算定した荷重は、本モデルが前提となっているものであることに注意が必要である。

表 4.3.1 TBM 支保工解析モデルの整理

計算モデル	慣用計算法モデル	全周地盤ばねモデル	連続体支持モデル
概要図			
概要	理論計算式があり、最も簡易な手法と考えられる。TBM 支保工は梁としてモデル化される。また、地盤との相互作用は、スプリングラインの水平変位に比例する荷重がスプリングラインから上下 45° 範囲に三角形分布として作用するものとして表現される。	この手法では、骨組み構造解析を用いる。TBM 支保工は、梁としてモデル化される。また、地盤との相互作用は、全周に設置されたばねの反力として表現される。	この手法では、FEM 解析を用いる。TBM 支保工は、有限要素としてモデル化も可能であるが通常は梁としてモデル化される。また、地盤との相互作用は、TBM 支保工の周りにある連続体との応力伝達により表現される。
TBM 支保工のモデル化	剛性一様が前提のため、部分的吹付けがモデル化できない。	各箇所の剛性を考慮でき、部分的な吹付け等を考慮できる。	各箇所の剛性が考慮できるだけでなく、梁要素だけでなく面要素としてもモデル化できる。
地盤との相互作用	スプリングラインの水平変位のみに着目しているため、TBM 支保工の変形モードを完全に考慮できない。	各箇所の地盤反力を考慮できる。また、内空側への変位に対する地盤反力、せん断方向の地盤反力を期待しないことも可能である。	各箇所の地盤反力を考慮できる。連続体を弾性体とすると、内空側への変位に対する地盤反力、せん断方向の地盤反力を期待することとなる。
TBM 支保工設計モデルへの適用性	地盤反力が現実とは異なったものとなる可能性がある。また、部分的な吹付けが考慮できない。	骨組み構造解析を行う必要があるなど慣用計算法に比べ多少労力を要するものの、地盤反力および支保剛性を適切に評価できるものと考えられる。	地盤反力を引張やせん断についても考慮することとなり、硬岩中硬岩を主な対象とする TBM トンネルについては、荷重に対する感度が非常に鈍くなる可能性がある。

図 4.3.2 に示す骨組み構造解析を行うに際して、荷重や地盤、支保工のモデル化が以下のよう仮定した。

- ①上方から作用する鉛直荷重は等分布荷重とし、下方からはそれと大きさの等しい反力を受けると仮定した。また、側方荷重は、深さ方向の荷重増分 γD (γ : 単位体積重量) を考慮し、側圧係数 λ を考慮した台形荷重とした。
- ②ひずみの計測が鋼アーチ支保工の建て込み後を基準としたため、支保工の自重は考慮しないものとした。
- ③地盤は、内空側変位、部材水平方向変位に対する剛性を無視した地盤ばねを全周に配することとモデル化した。地盤反力係数の算定は、トンネル標準示方書(開削工法編)⁵⁾の式を参考と

して算定した。すなわち、 $k_n = 1.58 \alpha \cdot E_0 \cdot B_n^{-3/4}$ で算定した。ただし、 k_n : 法線方向地盤反力係数 (kN/m^3)、 α : E_0 の算定方法および荷重条件による補正係数 (ここでは、 $\alpha = 1.0$ とした)、 E_0 : 地盤の変形係数 (kN/m^2)、 B_n : トンネル径 (掘削径と同値) である。

④ 支保工は、その単位奥行き当りの剛性が等価な梁としてモデル化する。すなわち、支保工の曲げ剛性 $E^* I^*$ 、軸圧縮剛性 $E^* A^*$ を $E^* I^* = E_s I_s + E_c I_c$ 、 $E^* A^* = E_s A_s + E_c A_c$ で算定する。ただし、 E_s 、 I_s および A_s : それぞれ鋼製支保工の弾性係数 ($= 210 \text{ kN/mm}^2$)、断面二次モーメントおよび断面積、また E_c 、 I_c および A_c : それぞれ吹付けコンクリートの弾性係数 ($= 4 \text{ kN/mm}^2$)、断面二次モーメントおよび断面積である。

④ 補足 : 吹付けコンクリートは、鋼製支保工とは異なり、場所打ちで打設された後、時間とともに硬化し変形性能が変化する。また、硬化過程においても荷重の載荷・変形が加わる。さらに、ひび割れが発生するとその変形性能が変化するとも考えられる。したがって、吹付けコンクリートの剛性を考えることは難しい。本研究では、数ある吹付けコンクリートの剛性算出方法のうち、比較よく用いられる物性値かつ吹付けコンクリートが鋼製支保工と一体となって地山を保持すると考えるモデルを用いる。

・吹付けコンクリートの弾性係数について

吹付けコンクリートを考慮した解析を行い場合、JH では「トンネルの標準設計に関する研究報告書」⁶⁾ において「吹付けコンクリートの弾性係数としては静的圧縮試験で得られる値をそのまま用いず、クリープ変形や乾燥収縮を考慮した値として $E = 40,000 \text{ kgf/cm}^2 = 4,000,000 \text{ kN/m}^2$ を用いることとした。」と記述している。したがって、本研究においても、吹付けコンクリートの弾性係数としては、この弾性係数を用いて解析を行うこととする。

・吹付けコンクリートと鋼アーチ支保工の合成について

本研究では、吹付けコンクリートと鋼アーチ支保工の合成は、吹付けコンクリートと鋼製支保工が曲げに対して完全に一体すると考えた一体梁と言われる考えた方によった。この考え方は、吹付けコンクリートと鋼製支保工が一体となって挙動することを想定している。図 4.3.3 に概要を示す。計算上、吹付けコンクリートの断面二次モーメントに対し、鋼製支保工図心軸からの距離および弾性係数の比で補正後、鋼製支保工の断面二次モーメントと合計する。

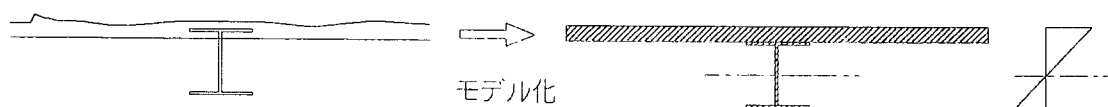


図 4.3.3 吹付けコンクリートと鋼アーチ支保工の合成

なお、吹付けコンクリートと鋼製支保工は一体とすることが望ましいとされているが、鋼製支保工はあるピッチで打設されるため、完全に一体とすることは不可能である。したがって、曲げに対しては吹付けコンクリートと鋼製支保工が別途挙動したり、吹付けコンクリートは鋼アーチ支保工に荷重を伝達するのみに機能しそれ自体耐荷力を発揮しない可能性もある。本研究では、予備解析において、曲げに対する挙動が吹付けと鋼アーチ支保工が分離した重ね梁として考えられる場合 (図 4.3.4)、さらに吹付けコンクリートの剛性を無視した場合 (図 4.3.5 参照)、両者のモデル化と比較し、算定される荷重が大差ないことも確認している (図 4.3.6 の例のように荷重変化による誤差の変動に対し、計算モデルの

差異による誤差変動は小さかった。これは、TBM トンネルの吹付け厚さが通常の山岳トンネルに比べ薄いことが要因であると考えられる。

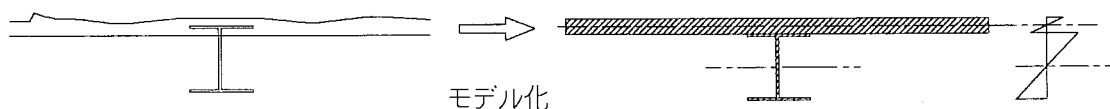


図 4.3.4 吹付けコンクリートと鋼アーチ支保工の合成（重ね梁）

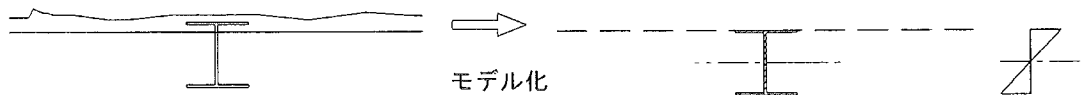


図 4.3.5 吹付けコンクリートと鋼アーチ支保工の合成（吹付け無視）

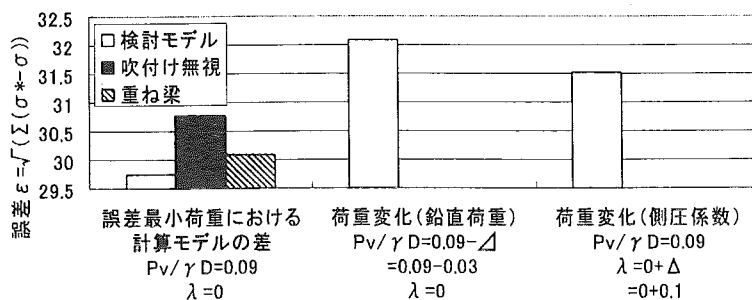


図 4.3.6 荷重変化と検討モデルの差による誤差発生状況(Oトンネル(1))

⑤図 4.3.7 に示すようにライナーや鋼製セグメントの断面二次モーメント，断面積は，主桁のみの値を用いる。

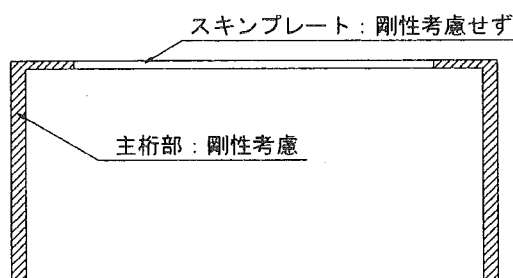


図 4.3.7 ライナーや鋼製セグメントの剛性算出概念図

⑥支保工の緒元，断面力は単位奥行き 1mあたりに換算して解析を実施する。したがって，算定される荷重も単位奥行き 1mあたりである。

4.4 解析結果および考察

ここでは，前節で述べた解析手法を用いて，計測された応力（実際にはひずみを断面力に算定し，縁応力を求めた）と誤差が最小になるように求めた鉛直荷重と側圧係数を整理し，考察する。荷重の整理は，本研究で採用した解析モデルにおいては，鉛直荷重 P_v と側圧係数 λ について検討すればよい。なお，鉛直荷重 P_v は，トンネルの掘削径 D と地山の単位体積重量 γ で除し，換算土荷重高さ $P_v/\gamma D$ で評価する。また，ここでは，簡易ライナー（共通支保パターン：L1），鋼製セグメント（同：L）は，（両者を共通支保パターン L として）区別せずに整理する。

表 4.4.1 に算定された荷重を示す。

図 4.4.1 に計測値と解析値の誤差が最小となるようにして得られた $P_v/\gamma D$ の平均値と、最大値と最小値を支保パターンごとに表した結果を示す。これより荷重の値は、おおむね $P_v/\gamma D = 0.3$ 程度の小さい値であることが分かる。また、荷重の値は地山が不良になるにつれて相対的に大きくなる傾向が読みとることができ、最大で $P_v/\gamma D = 0.9$ 程度、すなわち概ね掘削径に相当する程度の土荷重が作用すると考えられる。また、分析した断面数にばらつきはあるが、支保パターンが C 級以上の場合と D 級以下の場合で $P_v/\gamma D$ の大きさに差が生じていると考えられる。

表 4.4.1 算定された鉛直荷重と側圧係数

トンネル・No.	$P_v/\gamma D$	λ	トンネル・No.	$P_v/\gamma D$	λ
Aトンネル(1)	0.15	0.0	Gトンネル(7)	0.15	0.0
Aトンネル(2)	0.15	0.0	Gトンネル(8)	0.15	0.3
Aトンネル(3)	0.15	0.0	Hトンネル(1)	0.15	0.0
Aトンネル(4)	0.15	0.3	Hトンネル(2)	0.9	0.5
Aトンネル(5)	0.75	0.3	Hトンネル(3)	0.03	0.0
Bトンネル(1)	0.03	0.0	Hトンネル(4)	0.03	0.0
Bトンネル(2)	0.03	0.0	Hトンネル(5)	0.9	0.5
Cトンネル(1)	0.9	0.0	Hトンネル(6)	0.03	0.3
Cトンネル(2)	0.45	0.0	Hトンネル(7)	0.03	0.0
Eトンネル(1)	0.03	0.0	Hトンネル(8)	0.15	0.3
Fトンネル(1)	0.03	0.0	Hトンネル(9)	0.15	0.0
Fトンネル(2)	0.15	0.3	Nトンネル(1)	0.09	0.0
Fトンネル(3)	0.15	0.0	Nトンネル(2)	0.09	0.1
Gトンネル(1)	0.15	0.3	Nトンネル(3)	0.09	0.2
Gトンネル(2)	0.15	0.5	Nトンネル(4)	0.15	0.1
Gトンネル(3)	0.15	0.3	Nトンネル(5)	0.03	0.0
Gトンネル(4)	0.45	0.5	Nトンネル(6)	0.09	0.0
Gトンネル(5)	0.09	0.0	Oトンネル(1)	0.15	0.0
Gトンネル(6)	0.03	0.0	Oトンネル(2)	0.15	0.0

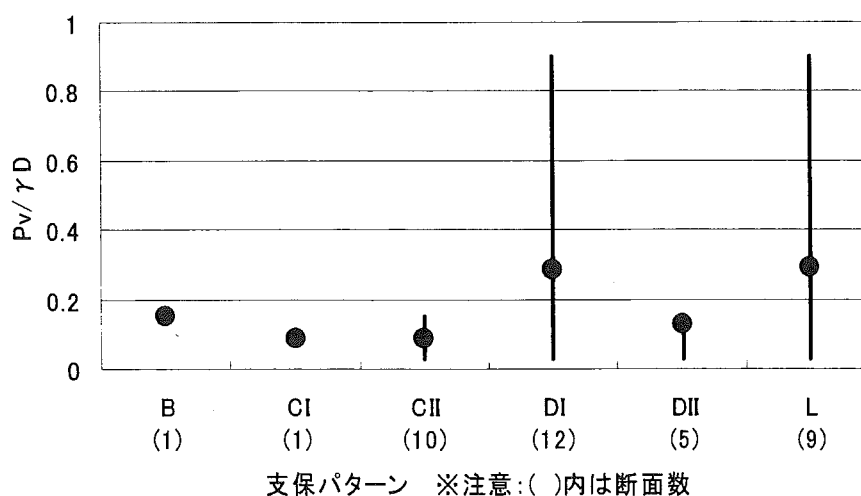


図 4.4.1 鉛直荷重と支保パターンの関係

図 4.4.2 に同様にして算定した側圧係数 λ の平均値と、その間の最大値と最小値を表した結果

を示す。これより側圧係数は支保パターン毎に大きな差は見受けられず、側圧係数は概ね 0~0.5 程度であると考えてよい場合がほとんどであった。

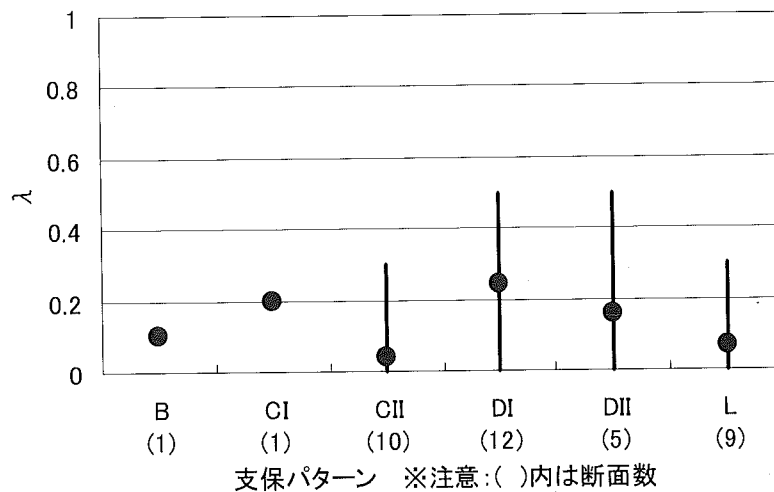


図 4.4.2 側圧係数と支保パターンの関係

図 4.4.3 に岩種を硬質・中硬質岩の場合と軟質岩の場合に分類し、支保パターンを C 級以上と D 級以下とに分類した場合の支保工に作用する荷重 $P_v/\gamma D$ の結果を示す。なお、図 4.4.3 中の円の大きさが $P_v/\gamma D$ が算定されたサンプル数の頻度を表している。また、岩種の分類は、道路トンネル技術基準³⁾等を参考として、表 3.2.1 に示す分類とした。

これより C 級以上の地山では岩種によらず $P_v/\gamma D$ が 0.2 以下の分布に集中して大きな差が見られなかったのに対し、D 級以下の地山では C 級以上の地山より $P_v/\gamma D$ は大きい値で得られていることがあり、さらに、硬質・中硬質岩の場合と軟質岩の場合を比較すると軟質岩の方が総じて $P_v/\gamma D$ が大きいと考えられる。以上より C 級以上の概して良好な地山において荷重値を検討する場合は岩種等の地山の性状によらず荷重の最大値が決まり、D 級以下の概して不良な地山の場合は岩種による影響を受けることが多いと考えられる。

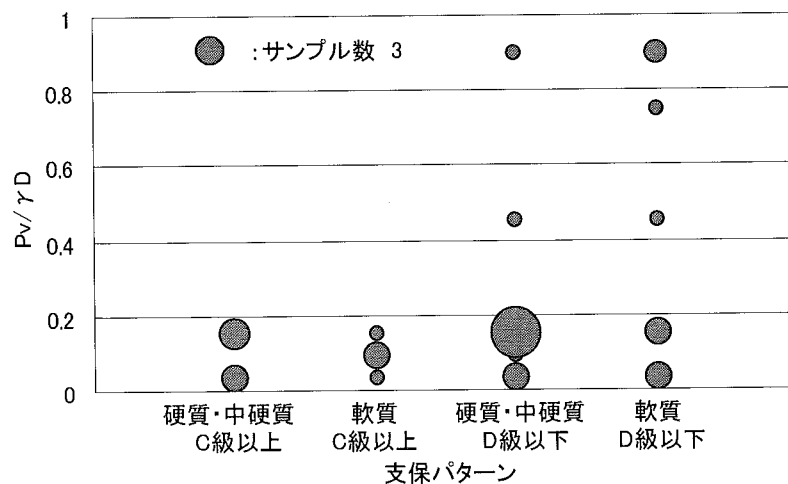


図 4.4.3 鉛直荷重と岩種・支保パターンの関係

5. おわりに

現在、トンネル施工を急速化に対する要望から TBM による施工が注目されている。

本研究では、今後の TBM トンネルの合理的設計・施工に資するため、近年施工された TBM トンネルを横断的に分析した。そして、今後の機械データの評価手法確立のため、施工時に得られた機械データと採用支保工および地山特性との関係について検討した。

また、現在の TBM トンネルの支保工は、過去の施工実績により設定されており、定まったものがなかった。そこで本研究では、今後の TBM 支保工設計手法の確立を目的として、TBM 支保工に作用している荷重を計測データより算定し検討した。

これらの検討から得た知見を以下に示す。

- ①各トンネル個別に見れば、機械データと支保パターンが単純な相関関係にあるとは必ずしも言えない。しかし、機械データやトンネルによっては、機械データと支保パターンがかなり良好な相関関係にあり、機械データによって採用すべき支保規模を設定できる可能性が高いことが分かった。また、トンネルを個別に分類した場合、支保パターンと機械データの関係は、スラスト推力との関係が明確なもの、カッタトルクとの関係が明確なものもあるが、大部分が両者との関係が明確なものであった。ただし、そのうち、どのタイプであるかは、支保選定指標を選択するという観点から慎重に各トンネル個別に判断する必要がある。
- ②機械データの指標には支保パターンの関連性が見受けられる指標があるが、ほぼ同等の支保規模であってもトンネル間でのばらつきが大きい場合もある。
- ③各トンネルを同一のグラフに並べ機械データと支保パターンとの関係を見た場合、カッタトルクよりスラスト推力が、軟質岩より硬質岩がトンネル間の機械データのばらつきが小さい。
- ④TBM マシンタイプについては、オープンタイプは、幅広い岩種で用いられ、採用された支保パターン（本研究で設定した共通支保パターン）は、B から DⅡが中心であった。一方、シールドタイプについては、中硬質岩と軟質岩が中心であり、採用された支保パターンは CⅠから L であった。また、スラスト推力およびカッタトルクなどの機械データの値としては、マシンタイプ毎での大小関係に明確な差は認められなかった。
- ⑤岩種で区別して全トンネルを平均的に見た場合、硬質岩の全支保パターンと中硬質岩・軟質岩の支保パターン（本研究で設定した共通支保パターン）B から CⅡについては、機械データを支保パターンの選定に用いることが、ある程度可能となる可能性が高い。また、機械データの中では、スラスト推力または、掘進、回転、掘削体積比といった各種エネルギーが支保パターンの選定指標として適している場合が多い。
- ⑥補助工法を採用する必要があるような不良地山部においては、機械データに何らかの変化が生じる可能性が高い。
- ⑦TBM トンネルの支保工に作用する荷重値は、土荷重に換算すると概ね $P_v/\gamma D = 0.3$ 程度の小さい値であり、最大で掘削径程度であった。また、側圧係数は概ね $0 \sim 0.5$ 程度となった。また、C 級以上の地山においては岩質等の地山の性状が荷重値に及ぼす影響は小さく、D 級以下の場合には岩質による影響を受けることが多いことが分かった。

また、今後、検討すべき課題には以下のものがあると考えられる。

- ①機械データの値のみの分析に留まらず、今後は、より詳細な地山の状況および施工時の状況との関係をさらに吟味すべきである。また、機械データ内に含まれる様々な不確定要素の影響を分析する必要がある。
- ②本研究で扱った機械データのみでなく、前方切羽探査の結果等、新たな指標との関連性を考慮に入れた分析も必要である。
- ③本研究で行った不良地山部での機械データ分析を基に、より詳細な不良地山部での施工状況の整理や傾向分析、さらに不良地山部の事前察知手法の開発を行うべきである。
- ④本研究で行った TBM 支保工に作用する荷重の検討を基に、より明確な支保工設計モデルの構築を行う必要がある。特に、今度 TBM トンネルの大断面化が進むと予想され、本研究で得られた知見を大断面 TBM での計測結果により検証することが不可欠である。

本研究の成果が、今後の TBM トンネル設計・施工の参考に、ましてや今後のトンネル全体の高速施工化・合理化の助けとなれば幸いである。

謝辞: 本研究のデータ収集・整理を行うに際し、ご協力頂きました関係者各位に深く感謝致します。

参考文献

- 1) (社) 日本トンネル技術協会：TBM ハンドブック 2002.2,p.113-123
- 2) 福井勝則，大久保誠介：TBM の掘削抵抗を利用した岩盤特性の把握 トンネルと地下,1997.7,p.35-43
- 3) (社) 日本道路協会：道路トンネル技術基準（構造編）・同解説 2004.11,p.80
- 4) 吉中龍之進，桜井春輔，菊地宏吉：岩盤分類とその適用，土木工学社 1989.7,p.42
- 5) (社) 土木学会：トンネル標準示方書開削工法編 1996.7,p.260
- 6) 日本道路公団試験研究所：トンネルの標準設計に関する研究報告書 試験研究所技術資料第350号 1986.2

