

# 比較的良好な地山での支保工の役割に関する実験的研究

中田雅博<sup>1</sup>・三谷浩二<sup>2</sup>・中川浩二<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修 日本道路公団 試験研究所 トンネル研究室室長(〒194-8508 東京都町田市忠生1-4-1)

<sup>2</sup>正会員 日本道路公団 試験研究所 トンネル研究室主任(〒194-8508 東京都町田市忠生1-4-1)

<sup>3</sup>正会員 工博 山口大学教授 工学部社会建設工学科(〒755-8611 山口県宇部市常盤台2557)

高速道路トンネル建設時にトンネル側壁部の押出し量として計測される最終内空変位量の頻度分布を調べると、ほとんどが20mm以下と小さく、支保工の変状もほとんどない。これは支保工が変位抑制効果を発揮した結果なのか、地山の性状に依存した結果であるのかという課題と、何を基準に支保工を増減するかという課題を提起している。そこで、一般的な地山の現場を中心として支保工量を積極的に削減し、変位量や支保工応力の変化を試験施工により検討し、支保工削減の可能性と支保工の役割を明らかにすることを試みた。その結果、変位は主に地山条件により決まり、支保工の役割は変位量を制御することよりもむしろ、緩みの増大や岩塊の抜け落ちを防ぐことにあると強く推察された。

*Key Words* : NATM, effect of support, measurement, convergence, deformation, standard tunnel support patterns

## 1. はじめに

公共投資のあり方が議論され、政府として公共事業費削減の目標が示される中で、削減に向けた具体的な行動が今後効率的に高速道路ネットワークを拡大するための大きな前提条件となっている。特に路線延長に占める比率が増大傾向にあるトンネルは、その建設費削減への取り組みが非常に重要な課題となり、この課題の解決のためには新技術、新工法などの技術開発だけでなく、従来の考え方や基準の見直しなどへの取り組みが求められて来ている。

再検討すべき課題の一つとして、従来から経験的な知見として扱われてきた支保工選定の考え方がある。具体的には、一般的な地山における支保工の役割を明らかにして、建設中あるいは建設後に必要な安全性と耐久性を確保しつつトンネル支保工量を削減することの可能性を探るとともに、従来の経験的な知見を統一・体系化することである。特に“地山に適合する支保工を選定する”というNATMの考え方から見ても、支保工の役割を確認することは重要な意味を有していると考ええる。

トンネルにおける支保の役割に関して、例えば

“トンネルの挙動は周辺地山により決まり、支保工の役割は緩みの抑制である”とする考え方がある一方で、“支保工は地山のひずみ(変位量)をある程度制御できる”とする認識もある。本来、支保工の効果は地山条件によって異なると考えられる。しかし、支保工が変位量にどの程度の影響を与えるかという基本的な事項については曖昧なまま議論が進められ、変位量や支保工の評価に関して現場で混乱が生じているものと考えられる。例えば現場ではひずみにより管理基準値が設定されることも多い。現場感覚としては地山が比較的良好で支保の剛性が天端沈下・内空変位に及ぼす影響は小さいと思われても、変位による管理基準値が支保工変更の目標値として理解され適用されている事例もあるように思われる。この原因は、標準工法がNATMになり、従来の“緩み土圧”の考え方が後退し、特性曲線で表現されるような応力とひずみの考え方で説明が試みられるようになったことや、いろいろな概念が整理されないまま議論が進められてきたことにあるように考える。また、支保工の増減が変位量に与える影響について現場において実証的に明確に確認されていないことも原因の一つと考える。合理的な支保工を選定するためには、単に標準支保パターンを画一的に適用する

のではなく、地山に合わせて支保工量を削減することができることを確認し、支保の役割や支保工増減の基準を明確にすることが工費縮減と地山に適合する支保工選定の観点から大きな意味を有するものであると考えた。標準支保パターンとは、分類された地山毎（B～DⅡ）に鋼アーチ支保工、吹付けコンクリート、ロックボルトの組合わせにより設定された支保工を言う。

これらのことから、筆者らは日本道路公団（以下 JH）のトンネル建設において多くの割合を占める比較的良好で一般的な地山（変位量が大きくなく、一般的な施工法で施工可能な地山）において、現地での実施工の中で標準支保と削減支保を施工し、比較するという実験を行った。これらの点については協力いただいたほとんどの現場での技術者から、少なくとも現地実験当初には大きな関心を寄せていただいたことから、その実務的な必要性がうかがわれた。本報告ではこの現地実験から得られた知見について報告する。

## 2. 支保工の役割に関する研究の現状と課題

NATMは、在来の工法と比べて支保工材料が異なるだけでなく、支保に作用する荷重や地山の挙動は、応力とひずみの考え方によっていることや、計測・観察を用いて地山状況に合う支保工を選定することに大きな特徴がある。この点についていくつかの設計指針的な文献<sup>1)~2)</sup>の記述によれば、“緩み荷重”の概念と“応力・ひずみ”による地山挙動の概念が示されているが、その取り扱い区分が明確に示されていない。

地山と支保工の関連に関する既往の研究については、主に以下の内容と考えられる。

- ①切羽観察結果、計測値等から、支保パターン毎の傾向を論じ、地山状況に対する支保工の妥当性に関する議論。計測値相互の関係を論じ、支保工選定の指標を明らかにする研究<sup>3)~11)</sup>。
- ②地山岩種ごとの変位の傾向を論じ、地山毎での挙動の違いから、岩種による特性を議論し、地山の挙動を説明する地山物性値等の指標の研究<sup>12)~18)</sup>。
- ③計測データを理論的に整理し、理論により地山の挙動を把握しようとする研究<sup>19)~22)</sup>。
- ④模型実験等により各支保工の効果を定性的、定量的に評価しようとする研究<sup>23)~26)</sup>。

これらの研究の目的は、現場での計測結果、切羽観察記録、支保工の変状、地山物性値等の情報から

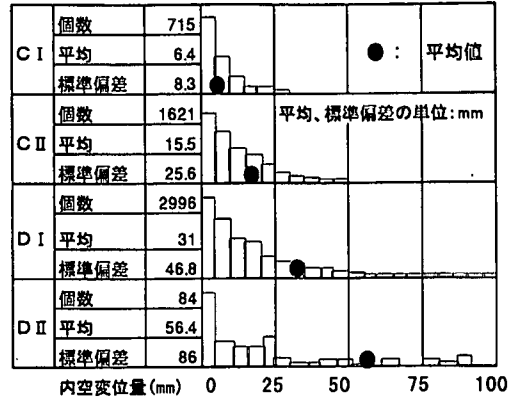


図-1 地山等級毎の内空変位量の頻度分布

地山や支保工の挙動と健全性を説明・評価し、適正な支保工を選定する指標や基準を見つけることにある。しかし一方で次に示す課題点も指摘することができる。

- ①変位量の大きいトンネルや、切羽の不安定なトンネル等、難渋したトンネルの研究は多くなされているが、一般的な地山での支保工のあり方に関する研究は少ない。
- ②支保工の役割を定性的にも定量的にも明確にすることなく議論されている研究が多い。
- ③従って、適正な支保工の判断基準が明確でない。

つまり、地山の安定性と適正な支保工の判断基準やクライテリアが明確でない。これに起因して適正な支保工量の議論が、「支保工の増減により変位量は変化する」との概念が定量的に確認がなされていない。支保工自体のもつ変位量への抑制効果は小さいとの指摘<sup>27)</sup>があるが、実際の計測結果を基に議論されていない点を指摘することができる。また、同様の地山に3種類の支保工を試験的に施工し、緩み領域の違いや支保工削減の妥当性を、変位量や支保工応力、変状の有無から議論<sup>28)</sup>がされているが、非常に硬質な地山に対してであり、支保工の役割は明確となっていない。

図-1は、平成7年までのすべての岩種を含む高速道路トンネルでの施工時の計測データから、JHの地山区分による地山等級毎に最終内空変位量（以下内空変位量）を頻度分布で示したものである。なお最終内空変位量とは、切羽進行に伴い一定値に収束したトンネル両側側壁の押し出し量（側壁間の縮小量）をいい、コンバージェンスメジャー等で計測される値の変化で示される。図-1は次のことを示している。

- ①地山が悪くなるに従い、内空変位量の平均値は大

表-1 変位量の小さな断面の頻度

	内空変位	天端沈下
20mm以下の比率	75%	84%
30mm以下の比率	84%	90%

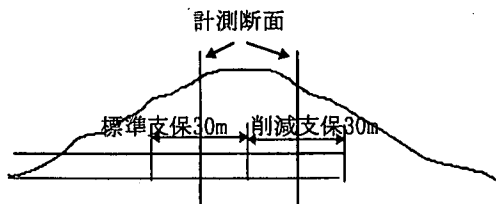


図-2 現地実験の方法の概念図

きくなる。地山が悪くなると地山強度が小さくなり、それに応じて内空変位量が大きくなることを意味している。

②地山が悪く大きな支保工量を採用するような地山においても、良好な地山と比較して標準偏差は大きくなるものの、全体として内空変位量が小さい断面が多く、頻度分布の形状もあまり異なっていない。

これらに関しては、「支保工の効果により変位量が抑制された」と解釈するのか、「切羽観察の結果地山は悪いと評価されたが、結果的に地山の性状に支配され小さい値となった」と解釈するのかという問題を提起している。また従来の研究の中でも明らかにされていない問題である。

地山等級毎の内空変位量の頻度分布から、20mm、30mm以下の変位量の占める比率を示したのが表-1である。この表から比較的変位量の小さな一般的な領域のデータが全体の8~9割を占め、変形余裕量や変位量を問題にする必要のない普通の地山が大部分を占めていることがわかる。

### 3. 現地実験

#### (1) 現地実験の方法

これまで現場検証された例がほとんどないことを念頭に比較的良好的な地山で、支保工削減の変位量への影響と、支保工の役割を明らかにすることを目的として現地実験を実施した。そこでは①支保工量を削減することで、変位量や支保工応力値にどのような変化が生じるのか、②その場合の支保工の実トンネルでの役割をどこまで説明できるのか、について明らかにすることを試みた。実験の方法としては、実トンネルにおいて図-2に示すような地質が同一と想定される隣接する区間で、標準支保パターンと、ロックボルト本数やH鋼を削減した支保パターン、一掘進長を伸ばしたパターン等を施工し、それぞれの区間の中間を計測断面として変位量、支保工応力を比較することとした。なお、基本的に変位量の計測は、計測断面の前後1mでも実施した。

一連の現地実験の概要及び変位量・支保工応力の

計測結果の一覧を表-2に示す。なお、支保工を増やした2例は、支保工量の多い変更後の支保パターンを標準支保とし、支保工量の少ない変更前支保パターンを削減支保として取り扱っている。また、上半最大平均ロックボルト軸力とは、一本のボルト軸力の最大値を上半部(一般的には3本)で平均した値をいい、下半部最大平均ロックボルト軸力とは、側壁部の最大下半ボルト軸力を両側壁(各1本)で平均した値をいう。平均吹付けコンクリート応力は、上半部分の3箇所(天端部、両肩部)の発生応力の平均値をいう。

現地実験はB~D Iクラスの広い範囲の地山等級で実施している。しかし、B、C Iクラスの地山では、支保工の効果が小さいと想定されること、Dクラスの地山では支保工の機能として比較的大きいと考えられるH鋼を削減した実験例がないことから、ここでは現地実験結果の中から主としてC II地山を対象として検討するものとする。

#### (2) 計測結果の傾向

7トンネルで地山物性試験として一軸圧縮試験を実施し29個の試験結果を得ている。この一軸圧縮強度から算定される地山強度比と内空変位量の関係を図-3に示した。ここではコアから得られる一軸圧縮強度を地山の一軸圧縮強度としている。

図-3は、地山強度比が大きくなると変位量はいくらか小さくなる傾向を示しており、筆者らが示している傾向<sup>31)</sup>と同様な結果となっている。なお、本現地実験でのトンネルで支保工の変状は見られなかった。

#### (3) 支保工削減の最終変位量への影響

##### a) 平均的評価

標準支保と削減支保を実施したトンネルにおける、各切羽での切羽評価点<sup>32)</sup>、内空変位量、天端沈下量の縦断方向変化を図化した1例(表-2に示すNo. 11のトンネル)を図-4に示した。縦断方向の測定間隔

表-2 支保工マルチ化の試験施工概要及び変位量と支保工応力の結果一覧 (各トンネルにおいて上段:掘削支保工 下段:削壁支保工)

No	地質・ 施工法	地山等級 削壁支保	地山 強度 比注①	評 価 点	初期天端 沈下速度 (mm/日)	天端沈下 量 (mm)	初期内空 変位速度 (mm/ 日)	内空変 位量 (mm)	上半最大平 均RB 軸力 (kN)	下半最大平 均RB 軸力 (kN)	平均SC応力 (N/mm <sup>2</sup> )
1	砂岩 ショートベンチ	B 下半ボルト	92	85	1	3	12	23	23.5	—	0.34
			54	81	1	6	0.5	81	33.3	—	0.75
2	砂岩 補助ベンチ全断面	B 12本→8本	336	76	0.6	11	0.9	15	6.9	—	—
			30.3	72	0.5	15	0.3	1	13.7	—	—
3	砂岩・頁岩 補助ベンチ全断面	CI 下半ボルト	14.9	71	—	14	—	0.6	11.7	0.98	-0.18
			14.1	68	0.4	6	-1	-2	12.7	—	-0.33
4	花崗岩 補助ベンチ全断面	CI 下半ボルト	45	78	1.8	25	2.8	4.4	17.6	10.8	0.022
			14	63	6.1	64	11.6	124	25.5	22.5	0.07
5	頁岩 補助ベンチ全断面	CII H鋼無し	—	48	3	4	4.9	5.8	11.7	53.9	0.04
			—	54	1	3	4.1	4.8	7.2	37.2	2.41
6	頁岩・砂岩 ショートベンチ	CII H鋼無し	—	59	4	5	0.6	1.3	—	—	—
			—	63	1	3	0.6	3.1	—	—	—
7	黒色頁岩 補助ベンチ全断面	CII H鋼無し	—	61	0.6	24	0.4	1.7	—	—	—
			—	65	0.9	7.9	0.9	8.5	—	—	—
8	砂質頁岩 補助ベンチ全断面	CII H鋼無し	19.3	52	-1	0.7	8.1	11.8	22.5	83.3	1.49
			14.8	52	1.6	2.3	4.1	10.2	4.1	64.7	3.12
9	砂質頁岩 補助ベンチ全断面	CII H鋼無し	19.3	52	-1	0.7	8.1	11.8	22.5	83.3	1.49
			14.9	33	2.9	9.6	16.7	33.4	13.2	13.4	6.4
10	凝灰岩質Tfb ショートベンチ	CII H鋼無し	7.3	78	-0.1	-1.7	1.9	2.8	20.6	19.6	0.09
			17.1	67	3.0	0.7	2.7	3.4	21.6	—	1.95
11	頁岩 補助ベンチ全断面	CII 下半ボルト	—	60	2.1	4.9	3.8	9	51.9	92.1	1.99
			7.5	63	0.7	1.5	0.5	1.6	14.7	—	1.36
12	頁岩 ショートベンチ	CII 下半ボルト	5.1	48	3	7	2.2	2.7	20.6	6.37	0.82
			24.7	56	3	5	1.1	2	22.5	—	0.56
13	砂岩・頁岩 補助ベンチ全断面	CII 下半ボルト	138	52	6	14	3.8	9.1	11.8	—	1.04
			22.1	56	6	17	3.5	13.8	21.6	—	4.1
14	石英安山岩	CII 1.2→1.35m	—	63	3	14	2.2	1.64	4.3	12.7	5.58
			—	67	3	11	2	13.4	4.4	1.57	1.45
15	頁岩・砂岩 補助ベンチ全断面	CII 15本→11本	—	74	3.2	5.6	4.7	8.4	2.6	48.0	—
			—	67	7.3	11.2	1.2	2.2	5.1	17.6	—
16	同上	CII 1.2→1.5m	—	74	3.2	5.6	4.7	8.4	2.6	48.0	—
			—	59	7.6	15.6	6.6	17.9	16.7	13.7	0.31
17	同上	CII 15本→11本	—	67	2.9	4.2	5	6.7	—	—	0.43
			—	63	2.4	3.4	2.7	5.6	—	—	1.98
18	砂岩・頁岩 補助ベンチ全断面	CII 15本→11本	45	69	-1	2.1	1.9	8.3	46.6	48.0	1.89
			39.6	61	1.6	4.1	1.1	3.9	29.4	9.31	0.43
19	凝灰岩質Tfb 補助ベンチ全断面	CII 15本→11本	14.4	65	3.7	7.6	0.1	2.3	45.1	66.6	0.36
			19.7	63	0.3	2.4	1.1	2.4	32.3	19.6	-0.07
20	花崗岩 補助ベンチ全断面	CII 1.2→1.5m	22.8	63	2	4	4.4	6.1	18.6	25.5	0.9
			48.2	67	3	5	3.6	7.1	13.7	16.7	0.09
21	頁岩 ショートベンチ	CII 1.6→2.9本増	—	52	3.8	21.5	10.8	9.7	—	—	—
			—	48	3.2	16.1	5.1	31.7	—	—	—
22	粘板岩 ショートベンチ	CII 1.2→1.5m	37.3	67	3	6	2.3	4.6	13.7	33.3	1.31
			2.9	67	2	4	2.9	3.9	6.76	13.7	0.67
23	凝灰岩 ショートベンチ	CII 注② -2	—	63	4.9	12.2	4.3	18.5	51.9	48.0	—
			—	67	3.1	11.3	3.2	14.9	33.3	35.3	—
24	頁岩・砂岩 補助ベンチ全断面	DI 4m→3m	—	56	0.9	2.6	2.2	5.1	15.7	23.5	2.92
			—	48	0.8	2.5	2.1	4	27.4	22.5	4.94
25	同上	DI 18本→15本	—	56	0.9	2.6	2.2	5.1	15.7	23.5	2.92
			—	41	0.7	6.4	0.5	2.4	33.3	13.7	2.06
26	泥岩 ショートベンチ	DI 4m→3m	1.55	56	0.9	8.5	1.9	12.9	20.6	31.4	1.6
			0.77	59	4	16.4	6	39.2	10.6	14.0	2.41
27	角礫岩質凝灰岩 補助ベンチ全断面	CII 14本→11本	11.4	56	2.8	7.9	4.1	9.7	18.6	10.3	0.07
			8.0	48	4.2	8.6	5.3	10.8	42.1	16.7	0.86
28	泥岩 補助ベンチ全断面	CI 下半ボルト	2.6	67	3.2	6.6	0.9	5.3	12.6	22.3	-0.1
			13.7	62	4.4	14.1	3.5	1.7	1.67	—	-0.1

注-1 Tfb:角礫凝灰岩 注2 ボルト長3m→4mで15本→19本 RB:ロックボルト SC:吹付コンクリート  
1.2→1.5mは一箇所最良の増を示す 注3 地山前壁比=コアの単位体積重量/(地山の単位体積重量×土被り高さ)

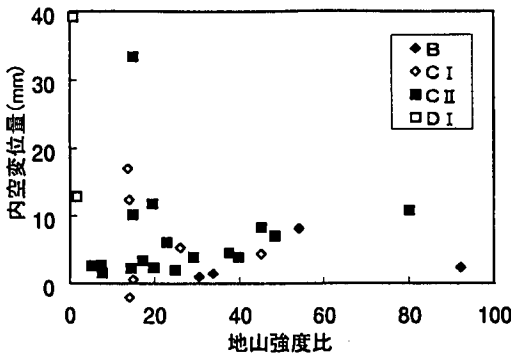


図-3 試験施工区間の地山強度比と内空変位量

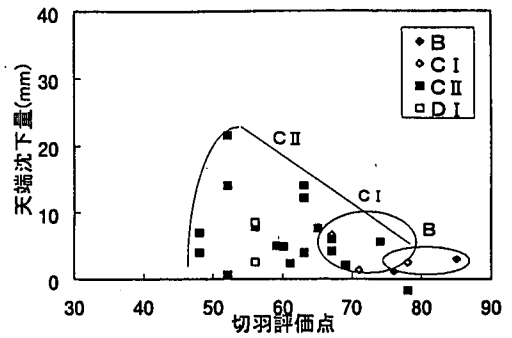


図-5 標準支保区間の切羽評価点と天端沈下量

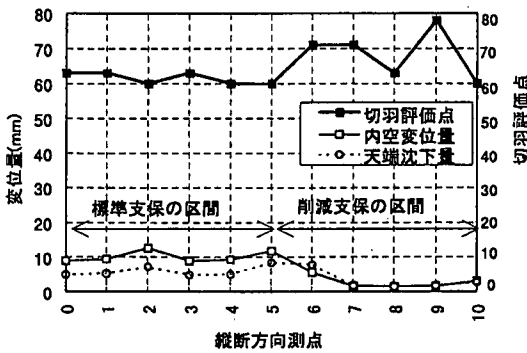


図-4 縦断方向の切羽評価点と変位量(トンネル No.11)

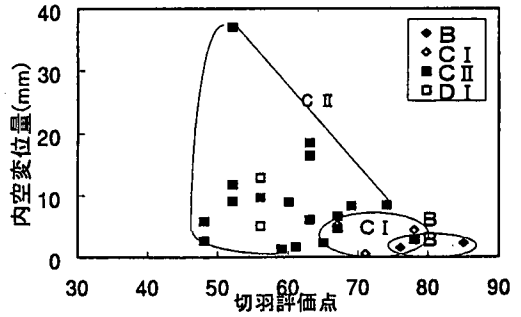


図-6 標準支保区間の切羽評価点と内空変位量

は6mであるので、標準区間と削減区間を加えた全体延長は60m程度である。切羽評価点とは、JHの旧切羽観察様式を用い、切羽の直接観察により9の項目に関して4つのカテゴリーで評価した結果を、0～100点となるように点数化した数値をいう。この値は地山の良否を相対的に表現し、0点が最も悪い地山で、100点が最良の地山を示している。図-4に見られるようにトンネル深部においても場所によって切羽評価点は変動する。従って標準支保区間と削減支保区間の比較において地山条件も考慮した取り扱いが必要と考えた。

図-5、6に表-2に示した全トンネルの標準支保区間での切羽評価点と天端沈下量、内空変位量との関係を示す。図-5、6から天端沈下量、内空変位量はB、CI、CIIの順に評価点の低下とともに分布のばらつきが大きくなる傾向がうかがえる。このことから評価点と変位量から見るかぎり、B、CIに比べてCIIは広い範囲の地山を含んでいることがわかる。また、地山区分がB、CIクラスは、切羽評価で評価区分してもそれぞれのグループにまとまる傾

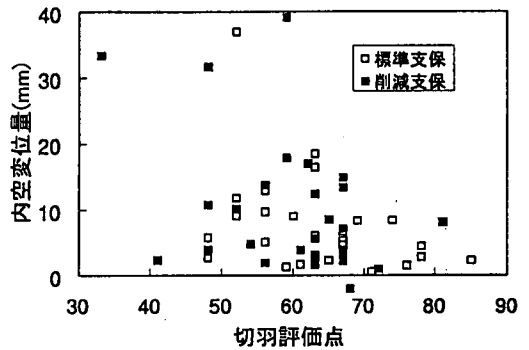


図-7 支保の削減前後の内空変位量の分布

向にあるが、CII、DIクラスでは両分布範囲が混在しており、分離が困難である。

図-7は図-6に削減支保区間のデータを加え、標準支保区間と削減支保区間の内空変位量の比較という視点で表したものである。図より標準支保区間と削減支保区間それぞれの分布に明確な差は見られない。

全データからCII地山を抽出し、支保の削減に伴う全データの平均変位量の変化と支保削減ケース毎に平均変位量の変化を示したのが表-3である。なお、支保削減ケースは大きく分けて次の3ケースである。

表-3 切羽評価点と変位量の平均値

削減項目		平均切羽評価点	平均内空変位量	平均天端沈下量
全体	標準支保	61.4	8.6mm	6.0mm
	削減支保	59.9	10.1mm	7.4mm
R B 削減	標準支保	61.1	10.3mm	8.1mm
	削減支保	60.4	9.6mm	8.7mm
一掘進長延長	標準掘進長	66.8	8.9mm	7.4mm
	掘進長延長	65	10.6mm	8.9mm
H 鋼削減	標準支保	58.3	5.9mm	1.8mm
	削減支保	55.6	10.5mm	4.4mm
H 鋼削減 <sup>(注-1)</sup>	標準支保	59.6	4.7mm	2.1mm
	削減支保	60.2	6.0mm	3.4mm

注-1) No. 9のデータを除いた平均値

①標準支保から下半のロックボルト削減、もしくはロックボルトのピッチを広くし全体的に本数を削減したケース。

②一掘進長を伸ばしたケース。

③標準支保からH鋼を削減したケース。

表-3から、以下のことがわかる。

①平均内空変位量、平均天端沈下量とも変位量は1.5mm程度削減支保区間の方が大きい。

②標準支保区間の地山と削減支保区間の地山とは、削減支保区間の地山がわずかに悪い傾向にあるが、ほぼ同様の地山であるといえる。

③ロックボルトの削減ケースでは、標準支保区間の地山より削減支保区間の地山の方が、地山はわずかに悪い傾向にある。平均天端沈下量は削減支保区間で若干変位量が増加し、平均内空変位量は僅かに逆傾向を示しているが、全体的に大きな変化はない。

④一掘進長を伸ばしたケースの切羽評価点は、他のケースの切羽評価点より若干高い。標準掘進長の地山に比べて掘進長を伸ばした地山では、地山が僅かに悪くなる傾向にあり、両変位量は地山の変化に従う傾向にあるが、その変化はわずかである。

⑤H鋼削減のケースでは、標準支保区間の地山より削減支保区間の地山の方が悪くなる傾向にあり、平均内空変位量で約5mm、平均天端沈下量で約3mm程度変位が大きくなっている。これは、表-2に示すNo. 9(評価点が19点低下)のトンネルの変位量の変化に影響されている。このトンネルを除いたデータの平均値を同様に表-3の最下段に示す。これによると削減支保区間で1mm程度変位量が大きくなっている。

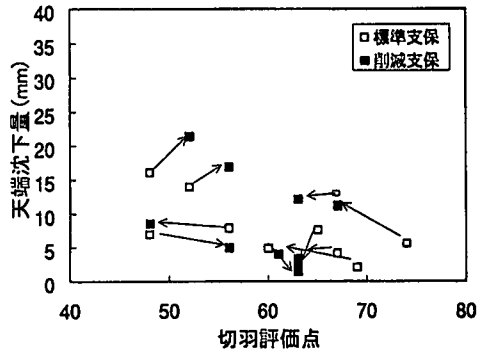


図-8 RB削減時の天端沈下量の変化

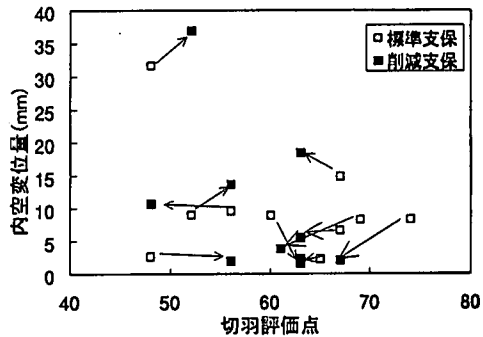


図-9 RB削減時の内空変位量の変化

⑥平均変位量から見ると、いずれの場合も支保工削減による変位量への影響が大きいとする傾向は見られない。

b) 個々の支保工削減が変位量に与える影響

支保工の削減が、実用的なレベルで変位量にどの程度影響を与えているかについて詳細に検討する。

一般的に同一の地山に対して支保工を削減すれば、変位量は増加の方向に向かい、また同一の支保工に対して変位量は地山の良否に従った方向に向かうと考えられる。すなわち地山の良否は地山の評価点で表され、支保工が同一の場合には地山評価点が増加すると変位量は減少し、評価点が減少すると変位量は増加すると考える。この考え方により、C II地山で実施した支保削減において、標準支保区間と削減支保区間で地山の変化と変位量の変化を個々の例について比較した。

イ) ロックボルトを一部削減したケース

ロックボルトを削減したケースに関して、内空変位量と天端沈下量の変化を図-8と図-9に示す。

図中の矢印は同一の現場において、標準支保区間から削減支保区間への切羽評価点と変位量の変化の方向を示す。図-8、9から以下のことがわかる。

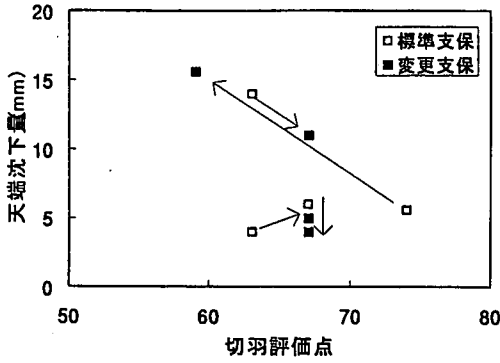


図-10 一掘進長延長時の天端沈下量の変化

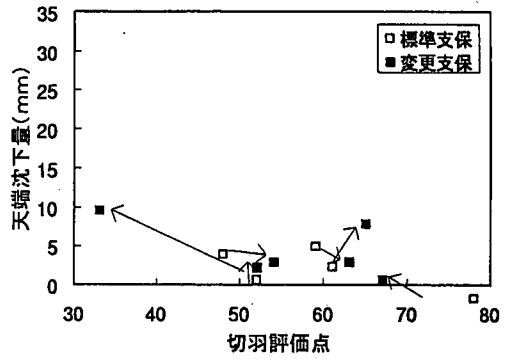


図-12 H鋼削減時の天端沈下量の変化

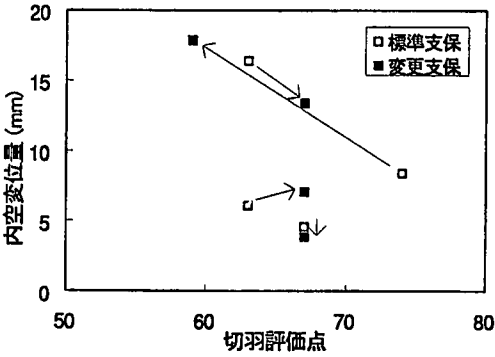


図-11 一掘進長延長時の内空変位量の変化

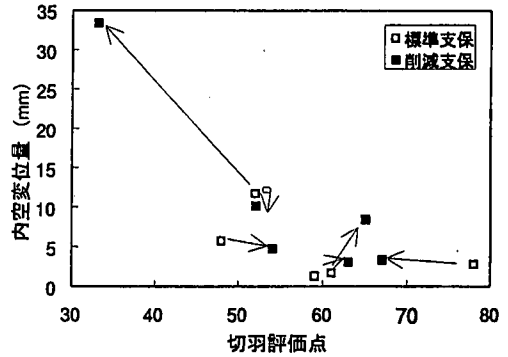


図-13 H鋼削減時の内空変位量の変化

①切羽評価点と変位量の分布は、切羽評価点の変化に伴い変位量が増減する傾向にあり、変位量はロックボルトの削減の有無にかかわらず地山評価点と相関の傾向がうかがえる。

②天端沈下量・内空変位量のいずれの場合も、標準支保区間と削減支保区間のそれぞれのグループの分布範囲に大きな相違が見られない。

③ロックボルト削減の天端沈下量への影響は、地山が悪くなったにもかかわらず変位量が小さくなる例やほとんど沈下量が変化しない例が5例と多い。このことからしてもボルトの削減が、天端沈下量に影響を及ぼしている傾向は見られない。

④ロックボルト削減の内空変位量への影響は、天端沈下量と同様に10例の内5例は地山が悪くなっても内空変位量が小さくなる例とほとんど変化しない例である。このことから、同様にボルトの削減は内空変位量へ有意な変化を与えていないと考える。

ロ) 一掘進長を伸ばしたケース

事例は4例と少ないが、一掘進長を伸ばすことで支保工の分担する範囲が広くなることによる相対的な支保工の削減の影響が考えられる。

図-10, 11に一掘進長を伸ばしたケースの天端沈下量と内空変位量の変化を示す。これらの図より次のことが分かる。

①切羽評価点で15点地山が悪くなると天端沈下、内空変位量ともに10mm程度大きくなった例はあるが、その他の例では変位量の変化は1~3mm程度である。この傾向は、天端沈下量、内空変位量ともに同様である。

②地山が悪くなっても、変位量が小さくなる例はないが、変位量への影響が大きいとは考えられない。

ハ) H鋼を削減したケース

H鋼を削減したケースに関して、切羽評価点の変化に対応した天端沈下量と内空変位量の変化を図-12と図-13に示す。

図-12, 13から、次のことがわかる。

①H鋼を削減することによる天端沈下への影響は、地山が悪くなり変位量が9mm程度増加したと思われるのが1例、地山は変化しないが6mm変位量が増加した1例、変位量がわずかに増加した2例、変位量が減少した2例となっているが、必ずしも変位量が増加する結果となっておらず、変位量への影響は小

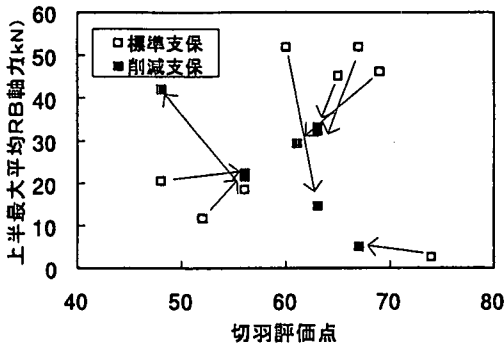


図-14 RB削減時の上半最大RB軸力の変化

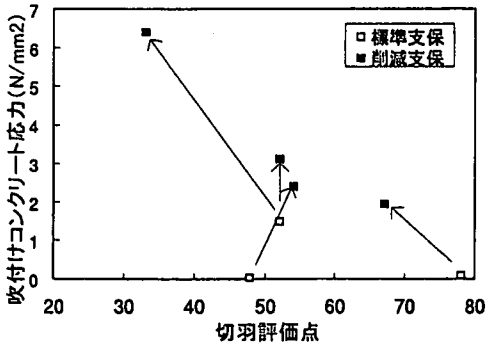


図-15 H鋼削減時の吹付けコンクリート応力の変化

さいと考えられる。

②内空変位量への影響としては6例中、変位量がほとんど変化しない例と減少する例が4例あり、1例は地山が変化したことにより変位量が大きく生じたと思われる例である。

③H鋼はロックボルトや吹付けコンクリートと比べて、初期段階から機能する支保工であり、この削減は初期の段階の緩みや崩落岩塊の移動を助長する懸念があるが、慎重に計測した場合においても顕著な変位量の増加となっていない。

ニ) 支保工削減が変位量に及ぼす影響のまとめ

支保工削減が変位量に及ぼす影響のまとめとして以下を得た。

①ロックボルト削減、一掘進長延長、H鋼削減は変位量に有意な影響を与えていない。

②試験施工として慎重に計測と観察を実施し、分析を行ったとしても、支保工削減の変位量への影響を定量的に示すことは難しい。

(4) 支保工削減の支保工応力への影響

a) ロックボルト削減による残存ロックボルト軸力の変化

ロックボルトを一部削減した場合の残りのロックボルト平均軸力と、削減しない場合の上半最大平均ロックボルト軸力との比較を行った結果を図-14に示す。図-14から以下のことが考察される。

①ロックボルト軸力の変化に関して、切羽評価点と軸力との相関関係は見られない。すなわち切羽評価点の増加により、残存ロックボルト軸力が減少する傾向はみられない。

②評価点と軸力の変化の方向は様々な方向に変化し、切羽評価点が変わらないか、もしくは悪い方向に変化しても軸力は減少しているケースが8例中4例あり、ロックボルト削減により、他のロックボルトの軸力が増加する傾向はうかがえない。

③ロックボルト軸力の発現は、地山の弾性変形だけでなく不連続面の動きに関連しているとする、不連続面の走向・傾斜等とボルトの位置関係に影響を受け、個々のロックボルト軸力は規則性のない結果となったと考えられる。

b) H鋼削減の吹付けコンクリート応力への影響

H鋼を削減することで、吹付けコンクリート応力への負担増加が考えられる。H鋼削減における標準支保区間と削減支保区間のそれぞれの吹付けコンクリート応力を図-15に示す。吹付けコンクリート応力測定の実例は少ないが、図-15から次のことが考察される。

①切羽評価点と吹付けコンクリート応力の分布は、切羽評価点の変化に伴い吹付けコンクリート応力が増減する傾向を示し、応力と切羽評価点とに相関の傾向がうかがえる。

②標準支保と削減支保の場合の吹付けコンクリート応力の分布は、それぞれ異なる分布領域を示し、H鋼の削減により吹付けコンクリート応力への負担増加の傾向がうかがえる。

③応力の負担増加は、2 N/mm<sup>2</sup>程度である。

(5) 支保工の役割

支保工削減による変位量への影響は大きくないことが実験結果からわかった。変位を抑える効果が大きくないとすると支保工の役目や増減の基準を何に求めるのかに関して述べる。

前述の現地実験において実施された地山岩石の一軸圧縮試験の応力-ひずみ曲線から、一軸圧縮強度を示す時の軸ひずみと一軸圧縮強度との関係を図



-16に示した。図-16より一軸圧縮強度を示す時の軸ひずみの値は、0.25%以上であり、地山の一軸圧縮強度が低くなるほど、相当するひずみは大きくなる傾向にあることが認められる。ここで得られたひずみから、これに相当する計測内空変位量を式(1)により得る。なお、天端沈下は土被りが大きくなると側係数が1に近くなり、トンネル側方と同じ程度の変位量になると想定されるので、内空変位量で変位量を代表する。

$$\delta = R * \epsilon / 100 * (1 - a / 100) * 2 \quad (1)$$

ここで  $\delta$  : 計測される内空変位量(mm)

R : 掘削半径(mm)

$\epsilon$  : ひずみ

a : 先行変位率(%)

式(1)でR=6000mm,  $\epsilon=0.25\%$ , a=40%, とすると、計測される内空変位量は18mmとなる。従って、少なくとも20mm程度の計測変位量では、地山は一軸圧縮強度以下のレベルで挙動していると想定される。このことは、不連続面の部分の安定性を除いて、20mm程度の内空変位量の地山の安定性は悪いと判断される状態にはないことを意味している。

また20mm程度の小さな変位量の断面での支保工の変状状況を調べてみる。代表的な支保工パターンC II, D Iの地山において、最終内空変位量が20mm以下、およびロックボルトの頭部プレートの変状や吹付けコンクリートの亀裂等の変状の有る場合の頻度を図-17に示した。岩種はすべての岩石種別の合計と代表的な岩種、花崗岩、粘板岩、泥岩・頁岩について個々に示した。図-17から、内空変位20mm以下では変状はほとんど生じていないことがわかる。なお、D I地山でもC II地山と全く同様の傾向がみられている。

これらのことを整理すると、変位量の小さい地山では地山は一軸圧縮強度を示すひずみ以前の状態で挙動し、支保工にも変状は見られない。また前述した支保工自体にも大きな変位抑制効果があるとする傾向が見られないことから考えると、支保工の役割は土圧に対抗する役目であるとは考えられない。

従来から支保工の役目として言われている、岩塊の抜け落ちを防ぎ地山のアーチ形状を保持し、地山の緩みを抑制する“緩み”の概念が、NATMにおいてもその役割として考えられる。従って、切羽の評価や支保工の増減の目安に関しても緩みや岩塊の抜け落ちを対象とした評価が必要になるものと考えられる。

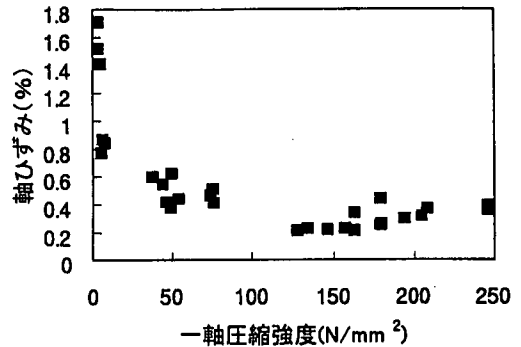


図-16 一軸圧縮強度の軸ひずみ

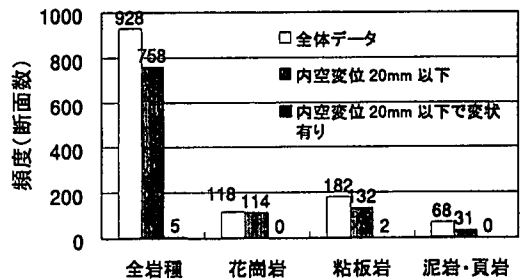


図-17 内空変位20mm以下の頻度と変状の頻度 (地山等級C II)

#### (6)まとめ

今回の試験施工の計測結果の分析から、支保工の削減が変位量や応力値に与える影響について考察し、明らかとなったことを以下にまとめる。なお今回の試験施工の範囲ではH鋼やロックボルトを削減した支保工においても、地山は安定しており、支保工の変状や崩落なども発生することなく施工が可能であった。

- ①C IIクラスの地山では、掘削により生じる変位量は、主体的に地山によって決まるものと考えられる。
- ②各削減支保工別にそれぞれ見ても、C II程度の比較的良好な地山では、マクロに見てロックボルト、H鋼等の支保工の削減による天端沈下量、内空変位量への影響は小さい。
- ③ロックボルト削減による他のロックボルト軸力への影響は見られない。H鋼削減のケースでは、吹付けコンクリート応力への影響、負担の増加は傾向として見られた。
- ④支保工の役割は、土圧に対抗する役割よりも、地山の緩みにより作用する力に抵抗すること、つまり初期の段階で緩み領域や岩塊の抜け落ちを抑えることにあると考えられ、切羽の評価と支保工の削減の

基準もこれらを評価する必要がある。

#### 4. あとがき

高速道路トンネルの大部分を占める比較的良好的な地山において過去のデータを分析することで、支保工の変化による変位量への影響は大きくないと考えることが妥当であると予想されたので、試験施工を積み重ねることによってこれを実証することとした。その結果予想どおり支保工の増減が変位量に与える影響が大きいとする結果は得られず、地山自体の影響の方がトンネルの挙動に支配的であると考えることが妥当であることが確認された。また、地山によっては従来(1996年度までの設計要領)のB~DIまでの標準支保パターンから支保量を削減できることがわかった。またJHは、1997年にこの試験施工による削減された支保工の試験施工結果を根拠として、支保量を削減した支保パターンを加えて設計要領<sup>39)</sup>の変更を行った。その中では、今回得られた支保工の役目を考察し、切羽評価の着目点を明確に記述している。

謝辞：本研究はJHが「支保工のマルチ化」プロジェクトの一環として行った一連の試験施工の結果の一部を取りまとめたものである。試験施工にご協力頂いたJHならびに施工関係者の方々に心から謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) 日本道路公団：設計要領Ⅲ集第9編トンネル，pp. 34, 1985年9月。
- 2) (財)鉄道総合技術研究所：NATMの設計施工指針，pp. 1, 44, 59, 1987。
- 3) 矢野俊明，寺田光太郎：片岩地帯におけるNATM，トンネルと地下，第12巻8号，pp. 19-28, 1981年8月。
- 4) 吉川恵也，朝倉俊弘，日吉直，遠藤真一：NATM計測実績の統計分析，第15回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp. 220-224, 1983。
- 5) 関順一，中村敏夫，岡田正之，三輪俊彦：NATMにおける変位予測法の適用性，第18回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp. 21-25, 1986。
- 6) 土肥穂，高橋祐祐，中島健一：トンネルの施工管理その1)，第18回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp. 26-29, 1986。
- 7) 川本茂，五月女隆，亀甲谷義高：第三紀泥岩地帯におけるNATMの計測管理，トンネルと地下，第18巻3号，pp. 7-15, 1987年3月。
- 8) 佐々木祐三，亀甲谷義高，磯野龍昭：古生層地山の地山評価と支保の選定，トンネルと地下，第19巻9号，pp. 37-46, 1988年9月。
- 9) 櫻井春輔，花田基樹，下村弥，大西三郎：鉄筋支保工の試験施工，トンネルと地下，第20巻11号，pp. 17-21, 1989年11月。
- 10) 西野治彦，篠川俊夫，矢田敬：トンネル切羽観察に基づく地山評価方法の検討，第21回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp. 266-270, 1989。
- 11) 三浦克，山橋正文，藤井泰雄：破碎性地山における支保工の効果について，第22回土質工学研究発表会，pp. 1641-1644, 1987。
- 12) 五味道義：統計解析によるトンネル掘削に伴うゆるみ深さの予測について，第18回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp. 36-39, 1986。
- 13) 中田雅博，鈴木昌次，古川浩平，中川浩二：NATM蓄積データに基づく施工時の地山挙動に関する研究，土木学会論文集，No. 567/VI-35, pp. 127-140, 1997。
- 14) 西野治彦，篠川俊夫，矢田敬：切羽観察に基づく変位予測と支保選定，第7回岩の力学国内シンポジウム，pp. 349-354, 1987。
- 15) 樽木武，平田登基男，西頭道彦，相川明：NATMの数値解析のための地山分類と地山定数，土と基礎，Vol. 34, No. 2, pp. 31-37, 1986年2月。
- 16) 日比野敏：岩盤構造物の特徴と岩盤物性評価，土と基礎，Vol. 35, No. 3, pp. 5-7, 1987年3月。
- 17) 今津雅紀：岩盤物性のデータバンク化とトンネルへの適用，土と基礎，Vol. 35, No. 3, pp. 9-15, 1987年3月。
- 18) 磯浦克敏，笹木胖，関順一，中村敏夫，神藤健一：強風化花崗岩の風化状態とNATM施工に伴う地山挙動，土と基礎，Vol. 28, No. 7, pp. 53-59, 1980年7月。
- 19) 北川隆：岩盤分類と岩盤-支保相互作用解析，第19回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp. 281-285, 1987。
- 20) 佐藤正彦，谷信弘，桑田俊男，一條俊之：山岳トンネルの新技術(27)，トンネルと地下，第20巻6号，pp. 67-73, 1989年6月。
- 21) 久武勝保：軟岩トンネルでのロックボルト効果に関する二三の考察，第8回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，pp. 267-272, 1990。
- 22) 蔣宇静，江崎哲朗，横田康行：軟岩トンネル周辺岩盤の安定機構とその設計について，トンネル工学研究論文・報告書第3巻，pp. 17-24, 1993年11月。
- 23) 水谷敏則，大久保雅憲，平木博美：軟岩地山の吹付けコンクリート覆工の支保機能，第17回日本道路学会論文集，pp. 172-173, 1987。
- 24) 土屋敬：ロックボルトのトンネル補強効果と最適設計パターンに関する実験的研究，土木学会論文集，No. 436/III-16, pp. 17-26, 1991。
- 25) 北條明，中村真，打田婿夫，吉田次男，櫻井春輔：2系統の不連続面を有する岩盤におけるロックボルトの補強効果，土木学会第49回年次学術講演会，III-367, pp. 724-725, 1994。
- 26) 鹿毛豊，今田徹，西村和夫：軸力分布からみたロックボルトの作用機構，土木学会第49回学術講演会，III-566, pp. 1122-1123, 1994。
- 27) 今田徹：トンネルの支保構造に関する構造力学的研究，1980。
- 28) 岩野政浩，白川賢志，真下秀明，田村壽夫，宮本義広：硬岩自由断面掘削機によるトンネル施工時の地山挙動と支保構造に関する検討，トンネル工学研究論文・報告書第6巻，pp. 23-30, 1996年11月。
- 29) 鈴木昌次，古川浩平，井上洋司，中川浩二：NATM施工実績に基づく事前設計の評価に関する一

- 考察, 土木学会論文集, 第427号/VI-14, pp. 261-270, 1991.
- 30) 日本道路公団: 土木工事共通仕様書第12章トンネル工, pp. 12の3, 1996.
- 31) 中田雅博, 西村和夫, 中野清人: 岩石ごとの地山挙動に関する研究, トンネルと地下, vol. 29 No1, pp. 53-63, 1998.
- 32) 日本道路公団: 土木工事施工管理要領, トンネル編, pp. 19, 1988.
- 33) 日本道路公団: 設計要領第III集第9編トンネル, pp. 79, 1985年9月.
- (1998. 3. 30受付)

## EXPERIMENTAL STUDY ON THE ROLE OF SUPPORT IN THE MODERATE ROCK MASS

Masahiro NAKATA, Koji MITANI and Koji NAKAGAWA

We studied frequency distributions of horizontal convergences (the variation of length between two points on the sides) measured during construction of expressway tunnels. The large part of these are small, less than 20mm and few supports are deformed. These facts suggest issues that vertical and horizontal convergences depend on the support effect or the properties of rock mass, and raise a question about what index we should use for support selection at site. Then we tried to reduce tunnel support in the moderate rock mass at 28 sites. We examined the difference in convergences and support stress in order to study the probability of reducing tunnel support and the effect of it. Judging from this study, it is observed that convergences depend on the ground conditions and the role of support is not to control these displacements, but to prevent falling of rock blocks and loosening of rock mass.