

(58) 都市NATMの調査分析結果に関する一考察

清水建設(株) 正会員○河田 孝志

東京電力(株) 正会員 岡田 仁

1. はじめに

トンネルの設計、施工を行う際、過去の類似トンネルを参考とすることは非常に重要である。これは、トンネルが不確定要素の強い地山を対象としているばかりでなく、施工システムによっても、変形、応力が大きく異なることによる。特に、都市域で施工されるトンネルについては、事前の調査、設計、施工などの不備により異常現象が生じると施工に支障をきたすばかりでなく、第三者に影響を及ぼす可能性もある。そのため、都市域のトンネル施工事例に基づき、事前調査、設計、施工、計測について整理するとともに、その問題点について分析することは、新たなトンネルの設計、施工を行う上で重要と考えられる。

本文は以上の点を鑑み、都市NATMに関する施工事例を文献調査に基づき整理、分析を行い、問題点についてまとめたものである。調査対象としたトンネルは、土被りが浅く地上、地中に構造物を有する都市NATMと、地上、地中に構造物は存在しなくても、都市NATMで問題となる切羽の安定、地表沈下が問題となった土被りの浅い土砂層に施工されたNATMである。調査対象は施工済、施工中（昭和62年3月現在）の55トンネルである。

調査は文献調査に基づき、昭和50年以後の国内出版物に限った。調査文献数は169編である。

2. 調査結果

調査項目は、①調査対象現場の概要、②地質、③設計、④施工、⑤計測について行い、問題点の分析は力学的安定性と施工性について行った。

2.1 調査対象現場の概要

調査対象現場の概要について表-1～表-5に示した。地質は砂質地山が最も多く、20件36.4%、用途については鉄道が最も多く30件54.5%である。

表-1 施工場所

施工場所	10	20	合計 55	(%)
1. 首都圏		22		40.0
2. 近畿圏	6			10.9
3. その他		27		49.1

表-2 施工年

昭和 年	件数	比率(%)	個 数	10	20
53	4	3.9	4		
54	7	6.9	7		
55	5	4.9	5		
56	13	12.9	13		
57	10	9.9	10		
58	18	17.8	18		
59	21	20.8	21		
60	9	8.9	9		
61	7	6.9	7		
62	7	6.9	7		
合計	101	100			

表-3 断面

断面	10	20	30	合計 55	(%)
1. 小断面 (3~10m)	10				18.2
2. 中断面 (10~50m)	10				18.2
3. 大断面 (50m以上)			35		63.6

表-4 地質

地質	10	20	30	合計 55	(%)
1. 砂質土		20			36.4
砂	4				7.3
粘土	9				16.4
粘性土	7				12.7
0~2kg/cm ² 固結土		13			23.6
2~20kg/cm ² 土			2		3.6
2. 軟岩					
20~200kg/cm ²					
3. 中硬岩					
200~ kg/cm ²					

表-5 用途

用途	10	20	30	合計 55	(%)
1. 電力洞道	9				16.4
2. 鉄道			30		54.5
3. 道路	10				18.2
4. 上下水道	1				1.8
5. 分水路	5				9.1

2. 2 地質調査に関する分析

地山の力学特性ならびに透水特性を分析するため、単体、一軸圧縮強度、変形係数（一軸圧縮試験、現位置試験）、粘着力、内部摩擦角、粒度分布、透水係数についてまとめた。図-1に一軸圧縮強度と変形係数の関係を、図-2に粘土、シルト分と透水係数の関係を示した。一軸圧縮強度と変形係数の間には正の相関があり、 $E = 155 q_u$ が得られている。

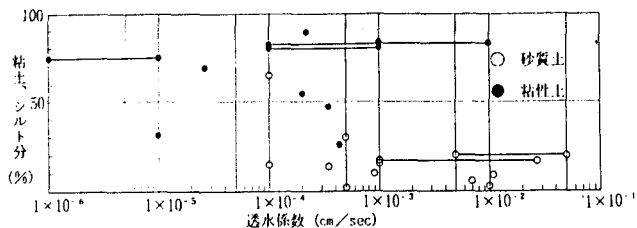


図-2 透水係数と粘土・シルト分の関係

2. 3 設計に関する分析

設計に関する分析を行うために、支保部材、設計手法、支保部材の作用効果についてまとめた。図-3～図-5に断面積と支保部材の関係を、表-6に加背割の分類を、表-7に一次覆工の設計手法を示した。

吹付け厚、ロックボルト本数、2次覆工厚と断面積の間には正の相関があるが相関性は低い。加背割はショートベンチが最も多く50%を占める。ただし、断面閉合を早めるために斜路を設けていない場合がほとんどである。設計手法はFEM解析を用いているものが64.4%と多い。特殊条件下のトンネルの特徴であると考えられる。支保部材の作用効果の特徴としては、ロックボルトを側壁部に打設し、トンネルの沈下防止と

表-6 加背割

種別	個数	合計
10	20	56
1. 全断面	8	14.3 (%)
2. ショートベンチ	28	50.0
3. ミニベンチ	8	14.3
4. サイロット	8	14.3
5. 中壁	2	3.6
6. その他	2	3.6

2. 4 施工に関する分析

施工に関する分析を行うために、掘削、吹付け、ロックボルト、仮設、補助工法について表-8～表-12に示すようにまとめた。

補助工法は切羽近傍で大幅な施工機械設備を必要とせず実施できる小規模な補助工法と、新たに機械設備を導入して実施する大規模な補助工法に大別した。

表-7 設計手法（施工時）

設計手法	個数	合計
10	20	45
1. 類似施工事例	7	15.6 (%)
2. Einstein	1	2.2
3. Kastner	1	2.2
4. Rabcevicz・岡	4	8.9
5. FEM	29	64.4
6. その他	3	6.7

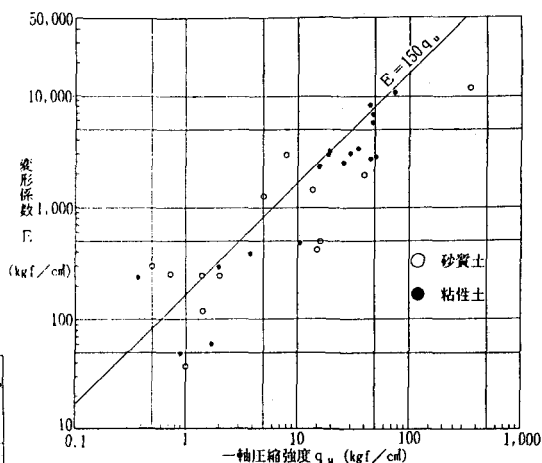


図-1 一軸圧縮強度と変形係数の関係

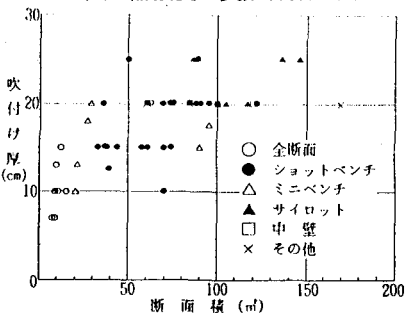


図-3 断面積と吹付け厚の関係

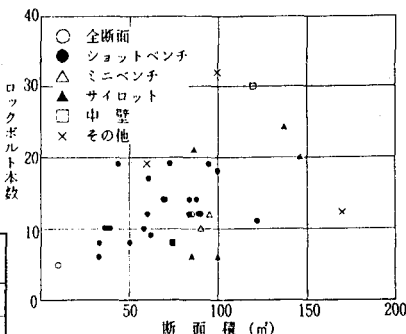


図-4 断面積とロックボルト本数の関係

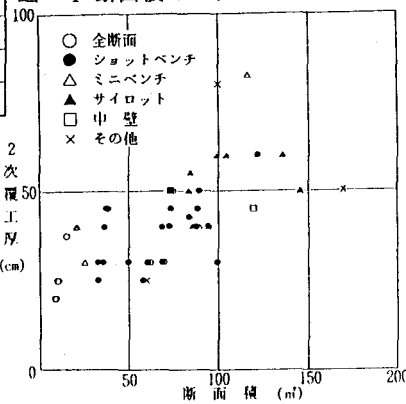


図-5 断面積と2次覆工厚の関係

掘削方式は自由断面掘削機による掘削が33件61.1%と最も多い。吹付け方式は乾式が43件87.7%と多い。近年、吹付け方式の主流が湿式になっているにもかかわらず乾式方式の採用が多いのは、①設備の簡素化、②小分割への対応、③長距離圧送、④砂質地山、湧水地山への付着を考慮しているためと考えられる。ロックボルトの削孔機械については、エアオーガーが16件55.2%と最も多い。砂質地山においては孔壁の自立に工夫がなされておりエアブローパイプを用いた施工例が2例みられる。仮設備についてデータが少なく十分な分析が行えなかったが、周辺環境への騒音、振動、粉塵対策に工夫がなされている。小規模な補助工法としてはフォアパイルング、リングカットが多い。また大規模な補助工法としては、坑口部のみに使用した場合を除くとウェルポイントが多いが、坑口部対策としては薬液注入が多くなっている。

表-11 補助工法（大規模）

種 類	個 数		合 計
	10	20	78
1.ティーブウル	10		12.8 (16.6) (%)
2.ウェルポイント	15		19.2 (25.0)
3.薬液注入		22 (13)	28.2 (21.7)
4.圧気工法	8		10.3 (13.3)
5.凍結工法	1		1.3 (1.7)
6.パイプーフ	16	(7)	20.5 (11.7)
7.垂直掘地	2		2.6 (3.3)
8.地盤改良	3		3.8 (5.0)
9.その他	1		1.3 (1.7)

※ () 内は坑口部のみの使用は除いた場合

2.5 計測に関する分析

計測に関する分析を行うために、計測結果（内空変位、天端沈下、吹付けコンクリート応力）と管理基準値についてまとめた。

図-6に土被りと地表面沈下の関係を示す。土被りが深くなるに従い地表面沈下は小さくなる傾向にある。管理基準値については、地山の破壊ひずみに基づき設定しているものが16件61.5%と最も多い。

3. 問題点の分析

3.1 力学的安定性

力学的安定性について、表-13に示すように異常現象についてまとめた。異常現象については9現場、13件について記述があったが、文献調査に基づくまとめであり、実際は表-13に示した以上の現象が生じているようである。異常現象については、切羽の崩壊、崩落、トンネルの沈下、異常出水がみられるが、地質、地下水位状況の急激な変

表-8 掘削方式

掘削機	10	20	30	合計
				54 (%)
1. 自由断面掘削機 (カッターロータリー ロータリー フライブロー ミット付)			33	61.1
2. バックホ	13			24.1
3. 人力掘削	6			11.1
4. 発破	2			3.7

表-9 吹付け方式

吹付け方式	10	20	30	合計
				49 (%)
1. 乾式			43	87.7
2. 湿式	2			4.1
3. SEC	4			8.2

表-10 ロックボルト用削孔機械

削孔機械	個 数		合 計
	10	20	
1. エアオーガー		16	55.2 (X)
2. エアブローパイプ		2	6.9
3. レッグドリル		3	10.3
4. 空圧トリルシャンキ		2	6.9
5. 油圧トリルシャンキ		6	20.7

表-12 補助工法（小規模）

種類	10	20	30	合計
				98 (%)
1. リングカット			30	30.6
2. 1次閉合	6			6.1
3. 小分割	7			7.1
4. 切羽吹付け	5			5.1
5. 切羽ボルト	0			0.0
6. フォアリング			38	38.8
7. 水抜きホーリング	9			9.2
8. その他	3			3.1

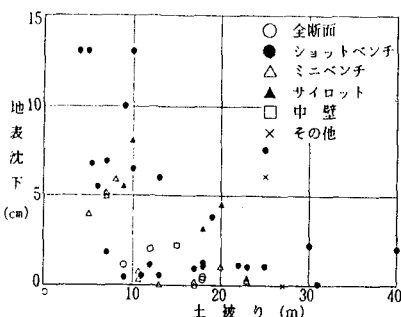


図-6 土被りと地表面沈下の関係

化、支保システム、施工方法（特に補助工法）の不適切による原因が主なものである。

図-7に切羽の安定に関する分析として、切羽状態を安定、不安定、崩壊に分類し要因別に分析した。土被りが10m以下、天端沈下、地表面沈下が50mm以上、粘土、シルト分が10%以下のトンネルにおいて切羽の安定に問題があったようである。

図-8と図-9にEinsteinの方法⁹⁾により求めた計算値と計測値の比較を示した。内空変位は計算値より実測値が小さい傾向にあるが、天端沈下は計測値が大きい傾向にある。これは、土被りの浅い土砂トンネルにおいては上載荷重が卓越する傾向があること、さらにトンネルの地下現象が生じているためであると考えられる。

3. 2 施工上の問題点

施工上の問題点について表-14に示すようにまとめた。施工上の問題点については21現象45件について記述があったが、施工区分で分類すると掘削、吹付けに関する問題点が多い。その現象としては、湧水による路盤の泥ねい化、余掘りの増大、吹付けコンクリートの剥離などである。

4. おわりに

文献調査に基づき都市NATMの施工事例について整理するとともに、力学的安定性、施工上の問題点について分析した。文献調査に基づく分析であるため、十分なデータが得られない施工事例も多かったが、都市NATMの特徴が得られたとともに、今後の設計、施工計画の有効な資料となりうると考えられる。今後は、資料の蓄積を進めるとともに、データベース化を行いたいと考えている。

参考文献

- 1) 土山、入川、河田、熊坂：NATMの設計における理論解の適用、土木学会第41回年次学術講演、1981年11月

表-13 異常現象のまとめ(1)

分類番号	異常現象の分類	現象	現象が生じた時期	原因	処	理	施工区間の対策
1	5	切羽における異常出水 90ℓ/min	仮2号立坑より 165m付近	①地山のクラック	①ホース取り ②ウレタン系 オーバーにて よる止水		
9	7 8	発達立坑部の坑口補強 としての薬液注入を行 ったところ地表面が20 mm高くなり22mm沈下した。	発達立坑 薬液注入時	①注入方法 の不備 ②盛土層の 分布	注入方法の 改善	注入方法 の見直し と計測	

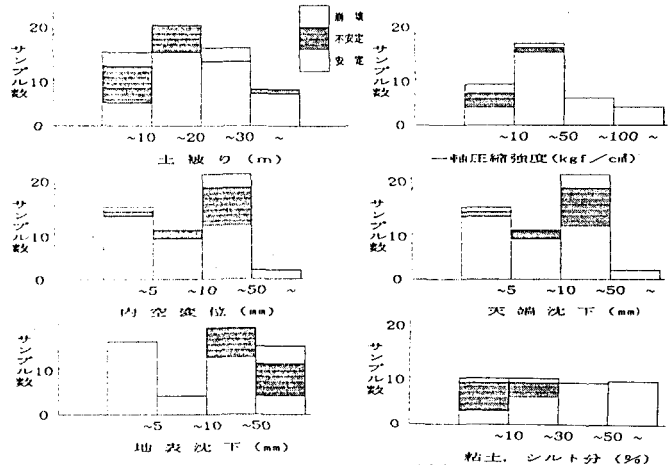


図-7 切羽安定に関する要因分析

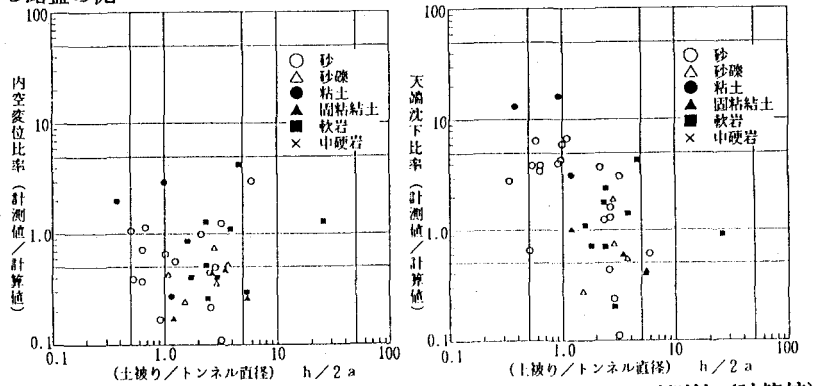


図-8 内空変位比率 (計測値/計算値) 図-9 天端沈下比率 (計測値/計算値)

表-14 施工上の問題点と対策(1)

分類番号	施工区分	問題点	原因	対策	効果
1	1.掘削 2.吹付け 3.ロックボルト 4.掘削支保工 5.補助工法 6.その他	14件 16件 5件 3件 6件 1件			
1	2	・吹付けコンクリート 施工時に剥離が多い	・小断面である ため、粉塵濃 度が高い	・粉塵低減剤を使用	○
11	1	・走行速度が遅く、移 動に時間がかかる	・ミゼットマイ ナーの構造上 の問題	・1ストローク長を できるだけ長くし、 移動による掘削時 間のロスを極力抑 えた	△

○ 効果がある △ 効果の程度は不明 × 効果はあまりない

(58) A Study on Results of Investigation and Analysis in Urban NATM

Takashi KAWATA

Shimizu Corporation

Hitoshi OKADA

Tokyo Electric Power Co., Inc.

ABSTRACT

In case of planning and designing of a tunnel, it is very important to refer past similar tunnels. During tunnel construction in urban area accidents frequently occur, such as the collapse of the tunnel face and so on because of defect of pre-investigation, designing and planning. These accidents have been obstacles to tunnel construction safety. For this reason, it is important to make clear problems in tunnel construction in urban area.

But it is also difficult to make clear problems because it is not obvious what kinds of factors contribute to tunnel construction safety. So in this paper we analyze thus:

First, we survey documents and we classify the condition by some items such as geological condition, designing, construction method and monitoring.

Second, we analyze the data from the tunnel documents.

Last, we make clear the main problems and select the important factors to tunnel construction safety.